• MECANISMOS CEREBRALES DE LA SINESTESIA •

INVESTIGACION y CIENCIA

JULIO 2003
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



UNIVERSOS PARALELOS

AURORAS NEGRAS

REDES SIN ESCALA

FARMACOS HUERFANOS

EL HOMBRE DE LOS HIELOS

ABRAHAM ZACUTO Y LA ASTRONOMIA EUROPEA EN EL MUNDO ARABO-ISLAMICO

00322
9 770210 136004



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

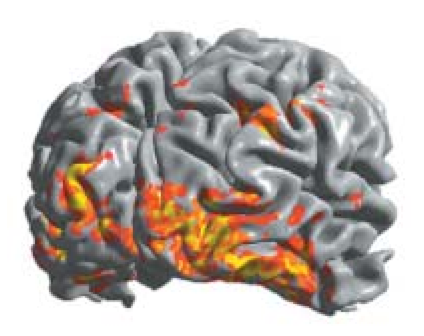
Julio de 2003

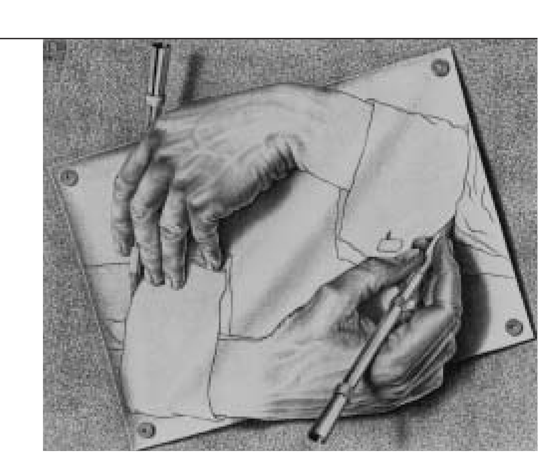
Número 322













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
REVIEWS EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

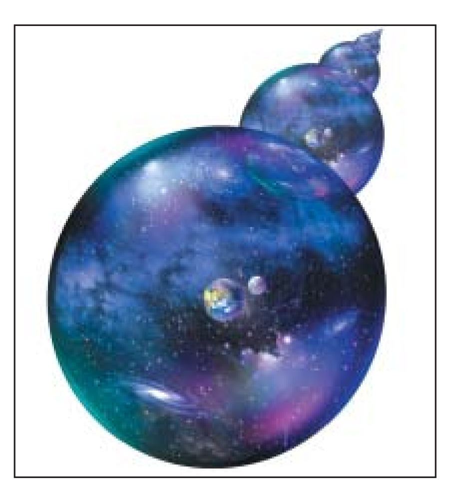
GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Jaume Garriga: *Universos paralelos*; Carmina Fuster: *Escuchar colores, saborear formas*; Luis Bou: *Ordenadores, paradojas y fundamentos de las matemáticas, Redes sin escala, Parásitos cerebrales* (CyS) y *Aventuras problemáticas*; Manuel Puigcerver: *Auroras negras*; Carlos Lorenzo: *El Hombre de los Hielos*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes, Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*



Portada: Alfred T. Kamajian

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 914 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

GÉNESIS POR RELÁMPAGO. «Harold Urey, químico de la Universidad de Chicago, ha sido el adalid de una teoría acerca del origen de la vida en la Tierra. Hace unos mil millones de años, dice la teoría, la atmósfera terrestre se componía de metano, amoniaco, hidrógeno y vapor de agua. Bajo la acción de descargas de rayos ultravioleta, esos compuestos se dividieron en radicales libres, que se recombinaron al azar para formar moléculas más complejas. Hace unos meses, Urey hizo que uno de sus alumnos, Stanley L. Miller, preparase una mezcla de metano, amoniaco e hidrógeno con agua hirviente en un circuito de vidrio estanco y puso el vapor a circular continuamente ante una chispa eléctrica. Al final del día la mezcla se había puesto rosa; tras una semana se veía de un rojo subido y oscuro, y contenía aminoácidos, los bloques constituyentes de las proteínas.»

LLAMANDO AL AGENTE MULDER. «¿Está el hombre solo en el espacio? En cuanto a la posible duplicación del hombre en otros planetas, no es verosímil que ningún animal esté obligado por el proceso evolutivo a imitar, aunque sea superficialmente, a una criatura sobre la que nunca posó sus ojos y con la que no compite en modo alguno. Tampoco podría un animal, por muy dotado que esté para la imitación, remedar a un hombre si viviera entre hombres. El individuo sentado a nuestro lado en un teatro no es imaginable que pueda ser un insecto disfrazado de hombre. Aunque la duplicación del cuerpo (hasta la ropa) fuese perfecta, el cerebro controlado por el instinto de la criatura, sus reacciones frías y concretas, en contraste con nuestro metabolismo de mamíferos de sangre caliente, harían inútil el disfraz.»

...cien años

EL SIGLO DEL CONFORT. «Para los americanos, ya tan acostumbrados a los ingenios mecánicos que los reciben sin ninguna sorpresa, el restaurante automático no es sino una evolución lógica de la máquina expendedora. El establecimiento, sito en Nueva York, cuenta con toda suerte de detalles. Sus luces eléctricas, sus deslumbrantes espejos y su mármol resplandeciente eclipsan a todo lo que pueda verse en Broadway (*véase la figura*). En el piso de arriba los clientes compran lo que desean; en el sótano se cocinan los alimentos y se envían al piso superior en pequeños montacargas.»



Restaurante automático, Nueva York, 1903

EL ARTE EPISTOLAR. «Hace un siglo, una carta aún poseía un cierto valor literario. Actualmente, sólo "correspondemos a su amable carta" o "nos permitimos indicarle". Queda aún para nuestros hijos renunciar a las fórmulas de cortesía que han llegado hasta nosotros. Las cartas del futuro serán sosos comunicados de brevedad telegráfica.»

...ciento cincuenta años

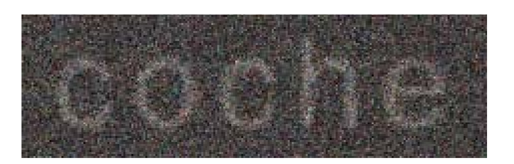
IGNORANCIA. «Un terrible disturbio se produjo la noche del miércoles en la residencia del doctor George A. Wheeler (Nueva York) a causa del hallazgo de algunos huesos humanos en el lugar. Se reunió una turba de 3000 personas armadas de porras, hachas y piedras. El interior del edificio fue completamente devastado por aquellos salvajes ignorantes. No hubo muertos, pero algunos agentes de la policía resultaron heridos. Si alguno en esa turba se hubiera roto un brazo o una pierna y lo hubiesen llevado a un médico para reducirle la fractura, ¿cómo habría podido ese médico curarlo si no conociese la anatomía del cuerpo humano?»

LA EDAD DE LA TIERRA. «Ante la Sociedad Real de Londres, sir Charles Lyell leyó un magnífico trabajo, con sorprendentes cálculos geológicos sobre los campos carboníferos de Nueva Escocia. Opina que esa formación geológica fue en tiempos un delta como el del Mississippi. Si incluimos los campos carboníferos de New Brunswick, hay allá unos doscientos billones largos de metros cúbicos de materia sólida. Más de dos millones de años tardaría el Mississippi en llevar al golfo de México esa cantidad de materia sólida a un ritmo de más de doce mil metros cúbicos por segundo. He aquí un tema de honda reflexión y examen, especialmente para los geólogos bíblicos.»

APRENDIZAJE Y PERCEPCION

Las partes antes que el todo

Cualquiera que haya tenido que depurar un texto sabe con cuánta facilidad el cerebro se engaña acerca de lo que está viendo. Reconoce como correcta la palabra escrita donde en realidad hay una errata. Denis G. Pelli, Bart Farell y Deborah C. Moore han investigado nuestra capacidad de reconocer palabras desde otro punto de vista. En vez de examinar la atención que confunde grafías en condiciones óptimas de observación, han estudiado el reconocimiento visual de palabras sumergidas en ruido espacial. Querían saber si las reconocemos como una unidad o a partir de sus letras. Para contrastar la capacidad humana definieron un reconocedor ideal, que calculaba correlaciones entre los puntos de un texto borroso y los de unas plantillas de las palabras que podía contener. Identificaba cada palabra del texto con la plantilla con la que guardase la máxima correlación. Resultó que, pese a la enorme experiencia que tenemos en ver palabras, nuestra eficacia quedaba muy lejos de la del reconocedor ideal; era, además, inversamente proporcional a la longitud de la palabra. El cerebro, con un poco de práctica, es un competente reconocedor de ciertas formas espaciales, de barras aisladas, por ejemplo; quizá la evolución dotó a los primates de neuronas que comparan esas imágenes con plantillas. En cambio, según el resultado de este experimento, parece que carecemos de plantillas para las palabras. Sólo dispondríamos de ellas para las letras o rasgos de letras. No vemos una palabra de manera holística, como un elemento en sí, sino por partes, con los consiguientes errores predecibles de ese tipo de identificación. El aprendizaje tendría, pues, sus límites: la experiencia no siempre nos dota de capacidad holística. Estaríamos condenados a captar sólo rasgos y a reconstruir objetos mayores a partir de esos trazos.



Si dispusiéramos de plantillas visuales de las palabras, las reconoceríamos mejor aun sumergidas en ruido

ESTADISTICA

Citar de oído

Los habitantes del universo visible, y de un poco más allá quizá, participan en un torneo. Se van enfrentando dos a dos; quien pierde, queda eliminado. El ganador habrá vencido en cien partidas seguidas. Entre jugadores idénticos, la probabilidad de ganar y perder en cada una sería ½; la probabilidad de ganar cien resultaría bajísima. ¿Un genio el campeón en ese juego? No necesariamente: incluso entre jugadores iguales, incluso entre jugadores igualmente malos, habría por fuerza un campeón nada menos que del universo, es decir, un ganador de cien partidas seguidas. O como le explicó Fermi al general que dirigía el proyecto Manhattan, según el cual tres de cada cien generales eran grandes y gran general era el que hubiese ganado cinco batallas seguidas: con ejércitos de fuerza parecida —eran otros tiempos—, la probabilidad de ganar cinco batallas, una tras otra, vale 1/32, es decir, precisamente tres en cien. M. V. Simkin y V. P. Roychowdhury recuerdan esta anécdota en un trabajo donde sostienen que los artículos científicos más veces citados quizá deban ese privilegio no a su mérito, sino a la suerte. Entre 1975 y 1994 se publicaron unos 24.000 artículos en la serie D de *Physical Review*. Cada uno fue citado en promedio 15 veces. Sin embargo, 44 artículos se citaron más de 500 veces. La probabilidad de que a un artículo de 24.000 le toquen al azar 500 citas de un total de 350.000 viene a ser de una en 10^{557}, cero a todos los efectos. ¿Demuestra que se debe al mérito tanta cita? No: el reparto observado —que un artículo de cada 600 se cite más de 500 veces— se obtendría también, calculan, si los autores escogiesen al azar tres artículos, los citasen y copiaran además un cuarto de las referencias incluidas en esos tres artículos. Y, en un trabajo anterior, Simkin y Roychowdhury, basándose en el análisis estadístico de las erratas en las citas científicas, llegaron a la conclusión de que la mayoría de las referencias se copiaban; sólo una de cada cinco veces se consultaba de verdad el original.

TEORIA DE LA EVOLUCION

Marabunta

En el filme de 1954 *Cuando ruge la marabunta*, Charlton Heston intenta salvar su cafetal del acecho de las hormigas soldado, insecto presente en las zonas tropicales de todo el planeta. Se presumía que la evolución había dotado, en repetidas ocasiones y a diferentes especies, con sus características típicas: el nomadismo, la busca de alimento sin exploración previa y las reinas sin alas que ponen hasta cuatro millones de huevos al mes. Sin embargo, Sam Brady, ahora en la Universidad de Cornell, comparó en la Universidad de California en Davis el ADN, la morfología y fósiles de unas 30 especies de hormigas soldado y llegó a una conclusión imprevista: un ancestro común de las hormigas soldado apareció en el megacontinente Gondwana, y cuando éste se fragmentó en otros continentes se difundió por ellos. Como explica Brady, "este grupo representa un caso extraordinario de 'estasis evolutiva' (estancamiento evolutivo) a largo plazo".

—Steve Mirsky



La formación de enjambres es una característica propia de las hormigas soldado

BIOLOGIA

Alimentos y reproducción



NEIL BROMHALL *Génesis Films/SPL*

¿Podría guardar el sexo de los niños alguna relación con el tipo de alimentación que siga la madre? Un estudio sobre ratones plantea la pregunta

Las ratonas, con alimentos ricos en azúcares y pobres en grasas, paren el doble de hembras que de machos, pero si siguen dietas bajas en azúcar y abundantes en manteca ocurre lo contrario. Las investigaciones de un grupo de la Universidad de Missouri-Columbia respaldan los indicios ocasionales que han venido relacionado desde hace docenas años el tipo de alimentación con el sexo de la descendencia de los mamíferos. Los alimentos podrían influir hormonalmente en el tracto reproductivo de las hembras de modo que los embriones de un sexo adquiriesen mayor probabilidad de supervivencia que los del otro sexo. La dieta podría también afectar al modo en que el esperma portador de cromosomas X o Y fertiliza los óvulos. O, como señala Cheryl S. Rosenfeld, miembro del equipo, el contenido energético de los alimentos quizá sesgue el porcentaje de los sexos: la dieta grasa era más alta en calorías.

—Charles Choi

INGENIERIA

El sonido del caucho

Unos ingenieros de la Universidad Purdue, en concreto del Instituto de Carreteras Seguras, Silenciosas y Duraderas, investigan cómo podría reducirse el ruido de los neumáticos en la circulación, un componente principal del sonido generado en una autopista. Efectúan sus experimentos con un aparato construido por ellos mismos, un tambor de 19 toneladas y 3,70 metros de diámetro. La cara del tambor se recubre con un tipo u otro de pavimento, y un brazo giratorio hace rodar por esa superficie un par de neumáticos suspendidos horizontalmente, uno en cada extremo del brazo. Mientras, unos micrófonos registran los tonos y niveles sonoros a diferentes frecuencias y distancias. Otras instalaciones tiran de los neumáticos con vehículos, o los fijan para que giren sobre unas cintas motorizadas de acero. Así no se reproducen las características exactas de los pavimentos reales. El aparato de la Purdue imita mejor la generación del ruido. Los ingenieros ensayaron cuatro tipos de cubiertas sobre superficies de hormigón suaves, porosas y texturadas. Según los primeros resultados, el tipo de pavimento influye más en el nivel sonoro que el dibujo de la cubierta. Las superficies porosas son las menos ruidosas. Se desconoce aún el verdadero origen del ruido que los neumáticos producen al rodar, pero se sospecha que las ranuras de la banda de rodadura, al canalizar el aire, actúan como diminutos órganos de tubos y que los distintos bloques que la componen vibran con frecuencias acústicas y golpean como martillos a medida que inciden en el pavimento y se separan de él.



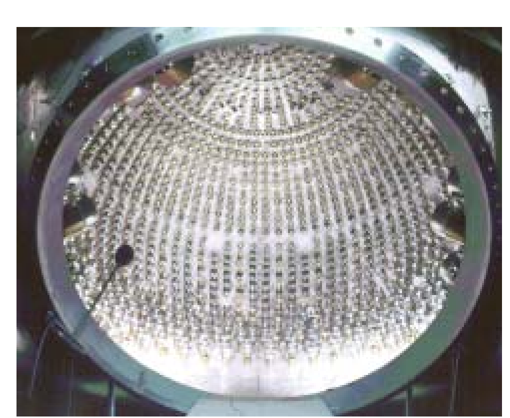
El Aparato para Pruebas de Neumáticos y Pavimentos (TPTA) del Instituto de Carreteras Seguras, Silenciosas y Duraderas

—Charles Choi

FISICA Y MEDIO AMBIENTE

Dificultades inesperadas

Los neutrinos apenas si dejan su marca en las cosas. Las sustancias que se emplean para captarlos son, en cambio, mucho más terrenales, y ensucian. Muy terrenal es, por ejemplo, el 1,2,4-trimetilbenceno que, mezclado con flúor, hace de líquido de centelleo en el detector de Borexino, un experimento encaminado a la detección de neutrinos solares de baja energía, en especial los procedentes de la reacción del berilio 7. Se trata de un líquido depresor del sistema nervioso central que irrita las vías respiratorias. Se emplea en colorantes y productos farmacéuticos. Borexino está instalado en la sala C del laboratorio subterráneo del Gran Sasso, que toma agua de acuíferos que alimentan a las ciudades de L'Aquila, capital de los Abruzzos, y Teramo. En agosto del año pasado Borexino vertió unos 50 litros de trimetilbenceno. Una parte llegó a un arroyo. Un tribunal solicitó un informe independiente, que se publicaba en mayo y advertía de posibles peligros para los acuíferos. El Instituto Nacional de Física Nuclear italiano decidió suspender todos los experimentos del Gran Sasso, y no sólo los de la sala C, que empleasen detectores líquidos, entre ellos el Observatorio de Neutrinos con Galio (GNO) y el propio Borexino, cuyo detector tendría que haber quedado concluido este año. Los investigadores padecen ahora la incertidumbre de no saber cuándo se restablecerán las actividades.



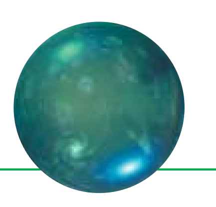
Interior de la Esfera de Acero Inoxidable del detector Borexino, con sus tubos fotomultiplicadores

NEIL BROMHALL *Genesis Films/SPL (arriba)*; PURDUE PHOTOGRAPHIC & GRAPHIC ARTS SERVICE/JOHN MUDERWOOD *(centro)*; BOREXINO EXPERIMENT-Photo INFN (F. di Salvatore) *(abajo)*

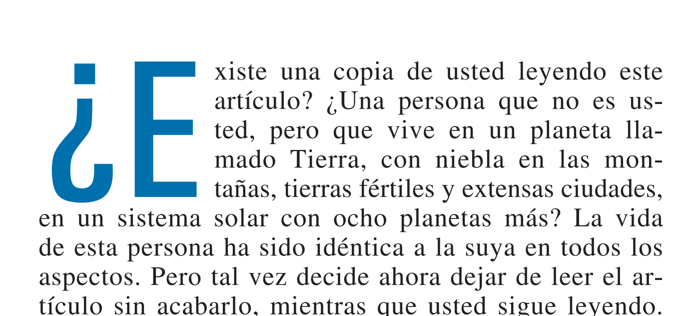


Universos paralelos

No son una mera fantasía, sino una consecuencia directa de las observaciones cosmológicas



Max Tegmark



¿Existe una copia de usted leyendo este artículo? ¿Una persona que no es usted, pero que vive en un planeta llamado Tierra, con niebla en las montañas, tierras fértiles y extensas ciudades, en un sistema solar con ocho planetas más? La vida de esta persona ha sido idéntica a la suya en todos los aspectos. Pero tal vez decide ahora dejar de leer el artículo sin acabarlo, mientras que usted sigue leyendo.

La idea de tal *alter ego* puede parecer extraña e inverosímil, pero tal vez tengamos que acostumbrarnos a ella, ya que la avalan las observaciones astronómicas. El más conocido de los modelos cosmológicos actuales predice que usted tiene un gemelo en una galaxia que se encuentra a una distancia de alrededor de 10 elevado a 10^{28} metros de aquí. Esa distancia es tan grande, que excede lo astronómico, pero eso no hace que su doble sea menos real. Esta estimación se deduce de nociones de probabilidad elemental, y ni siquiera utiliza física moderna especulativa, sino, tan sólo, que el tamaño del espacio es infinito (o al menos lo bastante grande) y que está casi uniformemente lleno de materia, tal y como indican las observaciones. En un espacio infinito, incluso los hechos más improbables tienen lugar en algún sitio. Existen infinitos planetas habitados, incluyendo no sólo uno, sino infinitos, que contienen gente con el mismo aspecto, nombre y recuerdos que usted, y que ejecutan cualquier permutación posible de las decisiones vitales que usted haya tomado.

Es más que probable que no vea nunca a sus otros yo. No cabe observar más allá de la distancia que la luz haya podido recorrer durante los 14.000 millones de años transcurridos desde que el universo empezara a expandirse. Los objetos visibles más distantes están ahora a unos 4×10^{26} metros —una distancia que define nuestro universo observable, también llamado volumen de Hubble, volumen horizonte o, simplemente, nuestro universo—. Los universos de sus otros yo son esferas del mismo tamaño, centradas en sus planetas. Es el ejemplo más directo de universos paralelos. Cada universo constituye sólo una pequeña parte de un "multiverso" mayor.

Según esta misma definición de "universo", se podría pensar que la noción de multiverso pertenecerá para siempre a los dominios de la metafísica. Sin embargo, define la frontera entre la física y la metafísica la posibilidad de contrastar la teoría experimentalmente, no lo extraña que parezca o que utilice o deje de utilizar entes inobservables.

Las fronteras de la física se han expandido gradualmente; ha ido incorporando cada vez conceptos más abstractos (y antaño metafísicos): una Tierra redonda, los campos magnéticos invisibles, la ralentización del tiempo a velocidades altas, las superposiciones cuánticas, el espacio curvo y los agujeros negros. Desde hace unos años, el concepto de multiverso ha engrosado la lista. Está basado en teorías bien contrastadas, como la relatividad y la mecánica cuántica, y satisface los dos criterios básicos de la ciencia empírica: predice y es falsable. Los científicos han considerado cuatro tipos diferentes de universos paralelos. La pregunta no es si el multiverso existe, sino cuántos niveles tiene.

Nivel I: Más allá de nuestro horizonte cosmológico

Los universos paralelos donde viven sus otros yo constituyen el multiverso de Nivel I. Es el tipo que suscita menos controversia. Aceptamos la existencia de cosas que no vemos, pero que veríamos en cuanto nos desplazásemos a otro punto de mira más

ALFRED T. KAMAJIAN

ventajoso, o si esperásemos un tiempo, como quien ve a un barco venir desde el horizonte. A esta categoría pertenecen los objetos que caen más allá del horizonte cosmológico. El universo observable crece un año luz cada año, a medida que la luz procedente de más lejos va teniendo tiempo de llegar a nosotros. Hay un infinito esperando a ser visto. Usted morirá, casi con toda seguridad, antes de que algún *alter ego* entre en el campo de visión, pero en principio, y si la expansión cósmica coopera, sus descendientes podrían observarlo con un telescopio suficientemente potente.

Si algo hay que achacarle a la idea de multiverso de Nivel I es su obviedad. ¿Cómo puede el espacio *no* ser infinito? ¿Hay alguna señal en algún sitio que diga: "El espacio termina aquí: cuidado, no se vaya a caer"? ¿Qué iba a haber más allá? Pero la teoría de la gravedad de Einstein cuestiona esa imagen intuitiva. El espacio podría ser finito si tuviese una curvatura convexa o una topología inusual (es decir, con interconectividad). Un universo en forma de esfera o de rosquilla, simple o múltiple, tendría un volumen limitado a pesar de carecer de bordes. El fondo cósmico de microondas permite verificaciones muy precisas de esas conformaciones [*véase* "¿Es finito el espacio?", por Jean-Pierre Luminet, Glenn Starkman y Jeffrey R. Weeks; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1999]. Hasta ahora, las pruebas apuntan en su contra. Los modelos infinitos concuerdan con los datos, que imponen cotas muy restrictivas a las alternativas.

Otra posibilidad es que el espacio sea infinito, pero que la materia esté confinada en una región finita que nos circunde: así decía el modelo, en otros momentos popular, del "universo isla". En una variante de la idea, la materia se enrarece a escalas grandes conforme a un patrón fractal. En ambos casos, casi todos los universos del multiverso de Nivel I estarían vacíos y muertos. Pero observaciones recientes de la distribución tridimensional de galaxias y del fondo de microondas muestran que la distribución de materia da paso a una aburrida uniformidad a escalas grandes, sin estructuras coherentes mayores que unos 10^{24} metros. Si este patrón se mantiene, el espacio mas allá de nuestro universo observable ha de rebosar de galaxias, estrellas y planetas.

Los observadores que viven en universos paralelos de Nivel I experimentan las mismas leyes de la física que nosotros, pero con condiciones iniciales diferentes. Según las teorías actuales, algunos procesos ocurridos tras la gran explosión repartieron la materia con cierto grado de aleatoriedad, generando todas las posibles configuraciones con probabilidad diferente de cero. Los cosmólogos suponen que nuestro universo, con una distribución casi uniforme de materia y fluctuaciones iniciales de densidad de una parte en 100.000, es un representante bastante típico (al menos entre aquellos que contienen observadores). Esta es la suposición subyacente en la estimación de que su copia idéntica más cercana se halla a una distancia de 10 elevado a 10^{28} metros. A unos 10 elevado a 10^{92} metros de distancia debería de haber una esfera de 100 años luz de radio idéntica a la que nos circunda, de manera que todas las percepciones que tendremos durante el próximo siglo serán idénticas a las de nuestros homólogos de allí. A unos 10 elevado a 10^{118} metros de distancia, debería de haber un completo volumen de Hubble idéntico al nuestro.

Estas estimaciones son muy conservadoras; se deducen contando los posibles estados cuánticos que un volumen de Hubble puede tener si su temperatura no llega a 10^{8} kelvin. Una manera de hacer el cálculo es preguntarse cuántos protones caben en un volumen de Hubble a dicha temperatura. La respuesta es 10^{118} protones. Cada una de esas partículas puede o no estar realmente presente en el volumen, así que se tienen 2 elevado a 10^{118} configuraciones posibles. Una caja que contuviese otros tantos volúmenes de Hubble agotaría todas las posibilidades. En números redondos, esa caja mediría 10 elevado a 10^{118} metros de lado. Más allá, los universos, incluido el nuestro, deben repetirse. Las evaluaciones del contenido de información del universo, basadas en la termodinámica o en la gravedad cuántica, deducen números similares.

Lo más probable es que su doble más cercano se encuentre mucho más cerca de lo que sugieren esos números, dado que los procesos de formación de planetas y de la evolución biológica decantan las probabilidades a favor de que así sea. Los astrónomos sospechan que nuestro volumen de Hubble contiene al menos 10^{20} planetas habitables; algunos podrían parecerse a la Tierra.

El marco del multiverso de Nivel I se utiliza de manera rutinaria en la cosmología moderna para evaluar teorías, aunque este procedimiento rara vez se declara explícitamente. Por ejemplo, considérese cómo los cosmólogos se valieron del fondo de microondas para descartar una geometría esférica finita. Las manchas frías y calientes de los mapas de microondas tienen un tamaño característico que depende de la curvatura del espacio; las observadas parecen demasiado pequeñas

Resumen/*Multiversos*

- La idea de los universos paralelos no es una simple metáfora: se trata de una de las muchas consecuencias que se siguen de las observaciones cosmológicas. El espacio parece tener un tamaño infinito. En tal caso, todo lo que sea posible encontrará alguna parte donde se convierta en real, por improbable que resulte. Más allá del alcance de nuestros telescopios existen otras regiones del espacio idénticas a la nuestra. Constituyen un tipo de universo paralelo. Puede calcularse incluso a qué distancias se hallan esos universos, en promedio.
- Lo anterior pertenece a una física bastante consolidada. Cuando se toman en cuenta teorías menos firmes, los cosmólogos concluyen que otros universos pueden tener propiedades y leyes de la física completamente diferentes. La presencia de tales universos explicaría varios aspectos curiosos del nuestro. Incluso podría resolver cuestiones fundamentales acerca de la naturaleza del tiempo y la inteligibilidad del mundo físico.

ALFRED T. KAMAJIAN (*fondo*); SARA CHEN (*inserto*)



El tipo más simple de universo paralelo es, sencillamente, una región del espacio que cae demasiado lejos como para que la hayamos visto ya. Hoy, nuestra capacidad de observación se limita a 4×10^{26} metros, o 42.000 millones de años luz, la distancia que la luz ha podido recorrer desde que empezó la gran explosión. (La distancia es mayor que 14.000 millones de años luz porque la expansión cósmica ha alargado las distancias.) Cada uno de los universos paralelos de Nivel I es, en lo esencial, como el nuestro. Todas las diferencias se deben a variaciones en la distribución inicial de la materia.

LIMITE DE OBSERVACION

4×10^{26} METROS

NUESTRO UNIVERSO

UNIVERSO PARALELO

UNIVERSO PARALELO

$10^{10^{118}}$ METROS

UNIVERSOS PARALELOS IDENTICOS

¿A qué distancia está el universo duplicado?

UNIVERSO DE EJEMPLO

Imagine un universo bidimensional con sitio para cuatro partículas. Dicho universo tiene 2^4, o 16, combinaciones posibles de materia. Si existen más de 16 de estos universos, deben empezar a repetirse. En este ejemplo, la distancia al duplicado más cercano es más o menos cuatro veces el diámetro de cada universo.

4 partículas

2^4 combinaciones

DISTANCIA A LA REPETICION

1 2
3 4

LAS 16 PROBABILIDADES

NUESTRO UNIVERSO

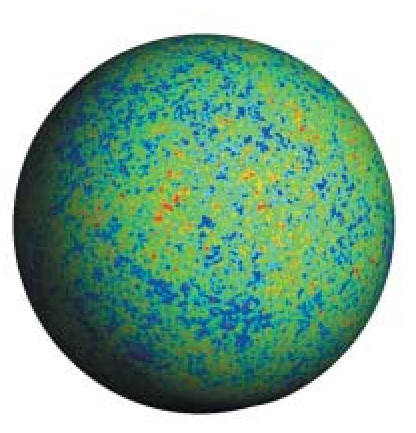
El mismo argumento puede aplicarse a nuestro universo, que tiene sitio para 10^{118} partículas subatómicas. El número de combinaciones posibles es por lo tanto 2 elevado a 10^{118}, o aproximadamente 10 elevado a 10^{118}. Multiplicando por el diámetro del universo nos da un promedio de la distancia al duplicado más cercano de 10 elevado a 10^{118} metros.

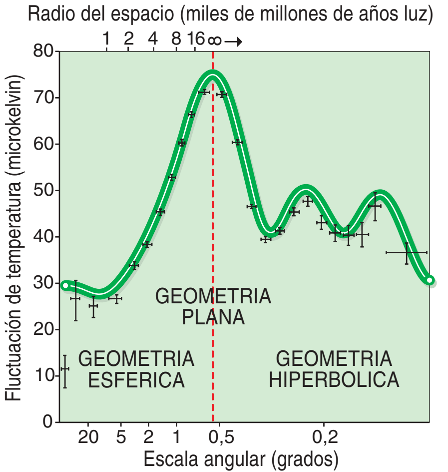
2×10^{-13} METROS

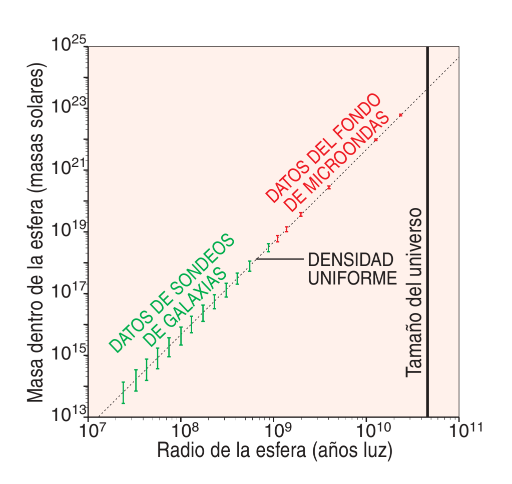
10^{118} partículas

$2^{10^{118}}$ combinaciones

8×10^{26} metros







LOS DATOS COSMOLOGICOS apoyan la idea de que el espacio continúa más allá de los confines de nuestro universo observable. El satélite WMAP midió recientemente las fluctuaciones del fondo de microondas (*izquierda*). Las fluctuaciones mayores tienen justo más de medio grado en diámetro, lo cual indica —después de aplicar las reglas de la geometría— que el espacio es muy grande o infinito (*centro*). [Una advertencia: algunos cosmólogos conjeturan que el punto discrepante a la izquierda del gráfico es un indicio a favor de un volumen finito.] Además, WMAP y el sondeo 2dF del corrimiento al rojo de las galaxias han encontrado que, a grandes escalas, el espacio está uniformemente lleno de materia (*derecha*), lo cual significa que los otros universos tienen que parecerse en líneas generales al nuestro.

para ser compatibles con una forma esférica. Pero hay que ser estadísticamente rigurosos. El tamaño medio de las manchas varía de manera aleatoria de un volumen de Hubble a otro; cabe, pues, dentro de lo posible que nuestro universo nos esté engañando: que sea esférico, pero con manchas menores de lo normal. Cuando los cosmólogos dicen que han descartado el modelo esférico con una confianza del 99,9 por ciento, lo que realmente quieren decir es que, si el modelo estuviese en lo cierto, menos de uno de cada 1000 volúmenes de Hubble tendría manchas tan pequeñas como las que observamos.

La lección es que la teoría de los multiversos puede ser contrastada y falseada aunque no podamos ver los otros universos. La clave estriba en predecir cuál es la colectividad estadística de los universos paralelos, y especificar una distribución de probabilidad, o lo que los matemáticos llaman una "medida", sobre dicha colectividad. Debería obtenerse de esa forma que nuestro universo es uno de los más probables. Si no —si de acuerdo con la teoría del multiverso vivimos en un universo improbable—, algo falla en la teoría. Como discutiré más tarde, ese problema de la medida puede resultar bastante arduo.

Nivel II: otras burbujas postinflacionarias

Si el multiverso de Nivel I era duro de digerir, intente imaginar un conjunto infinito de multiversos de Nivel I, algunos tal vez con dimensionalidades espaciotemporales diferentes y diferentes constantes físicas. La teoría de la inflación caótica eterna, hoy en boga, predice esos otros multiversos, que componen entre todos un multiverso de Nivel II.

La inflación es una extensión de la teoría de la gran explosión que ata muchos de los cabos sueltos de ésta y explica por qué el universo es tan grande, uniforme y plano. Una rápida dilatación del espacio, ocurrida hace mucho tiempo, explica de un golpe estas propiedades del universo, así como algunas otras [*véase* "El universo inflacionario", por Alan H. Guth y Paul J. Steinhard; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984; y "El universo inflacionario autorregenerante", por Andrei Linde, enero de 1995]. La predice una amplia clase de teorías de partículas elementales, y todos los elementos de juicio disponibles la avalan. La frase "inflación caótica" se refiere a lo que sucede a las escalas mayores. El espacio como un todo se está estirando, y seguirá haciéndolo para siempre, pero algunas regiones del espacio dejan de dilatarse y forman burbujas bien definidas, como las bolsas de gas que se crean mientras sube una masa de harina. Se engendra un número infinito de esas bolsas. Cada una es un universo embrionario de Nivel I: infinito en tamaño y lleno de materia depositada por la energía del campo que causó la inflación.

Esas burbujas están más que infinitamente lejos de la Tierra, en el sentido de que usted nunca llegaría allí aunque viajase a la velocidad de la luz. La razón es que el espacio que media entre nuestra burbuja y sus vecinas se expande más deprisa de lo que usted pueda viajar por él. Sus descendientes nunca verán a sus dobles en otras partes del Nivel II. Por la misma razón, si la expansión cósmica se acelera, como las observaciones ahora sugieren, puede que no vean a su *alter ego* ni siquiera en el Nivel I.

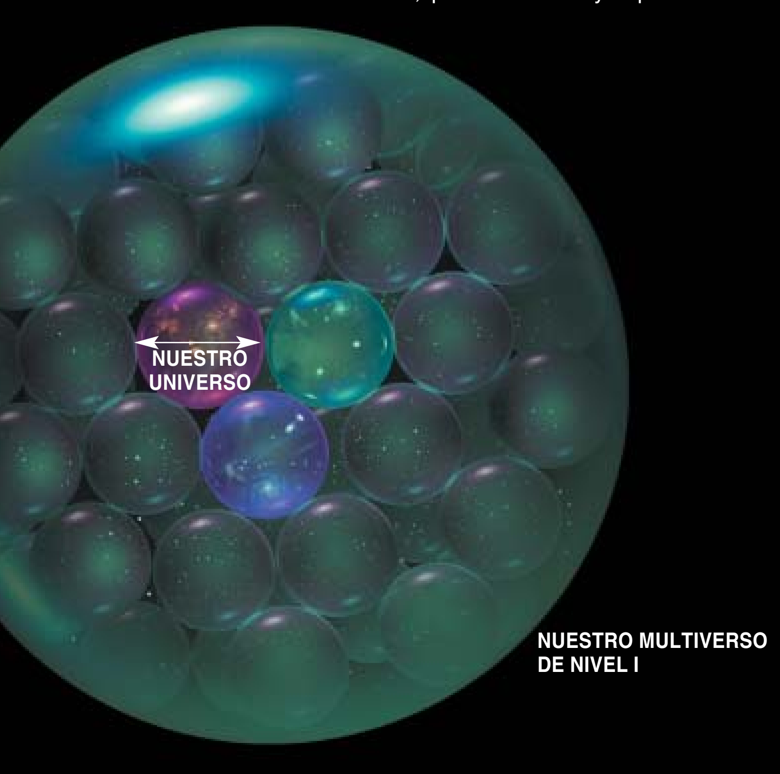
El multiverso de Nivel II es mucho más diverso que el de Nivel I. Las burbujas varían no sólo en sus condiciones iniciales, sino también en aspectos de la naturaleza que parecen inmutables. De acuerdo con el punto de vista hoy prevaleciente en física, la dimen-

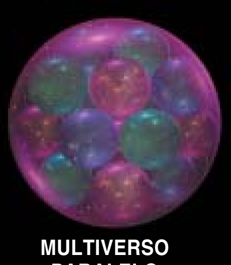


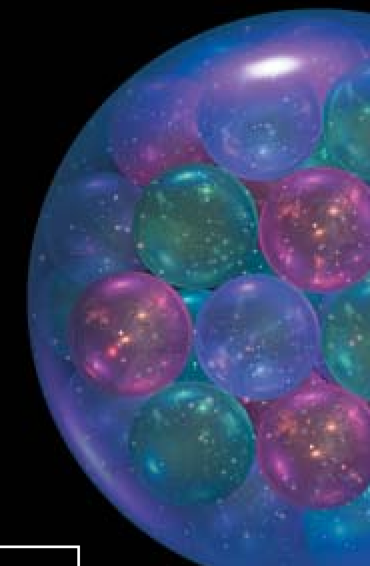
MULTIVERSO DE NIVEL II

Un tipo algo más elaborado de universo paralelo emerge de la teoría de la inflación cósmica. Nuestro multiverso de Nivel I —es decir, nuestro universo y las regiones contiguas del espacio— es una burbuja inmersa en un volumen todavía más vasto, pero en su mayor parte vacío.

Existen otras burbujas, desconectadas de la nuestra. Nuclean como gotas de agua en una nube. Durante la nucleación, las variaciones en los campos cuánticos dotan a cada burbuja de propiedades que las distinguen de otras burbujas.

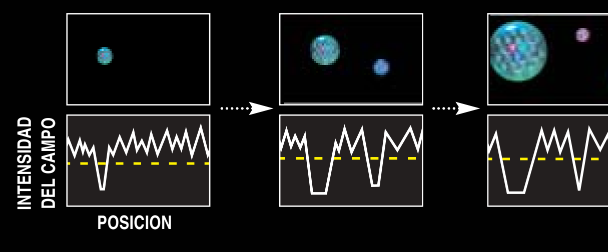






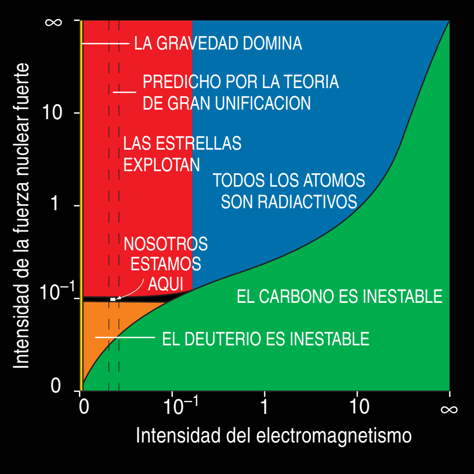
Nucleación de burbujas

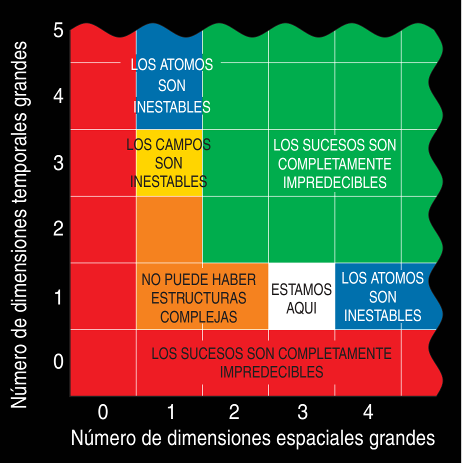
Un campo cuántico, el inflatón, causa la rápida expansión del espacio. En el grueso del espacio, fluctuaciones aleatorias impiden que el campo decaiga. Pero en ciertas regiones pierde su intensidad y la expansión se ralentiza. Esas regiones se convierten en burbujas.



Indicios

Los cosmólogos infieren la presencia de multiversos de Nivel II escrutando las propiedades de nuestro universo. Estas propiedades, incluidas la intensidad de las fuerzas de la naturaleza (*derecha*) y el número de dimensiones del espacio-tiempo (*más a la derecha*), se establecieron por medio de procesos aleatorios durante el nacimiento de nuestro universo. Aun así, tienen exactamente los valores que hacen posible la vida. Ello sugiere la existencia de otros universos con otros valores.





ALFRED T. KAMAJIAN (*fondo*); CORNELIA BLIK (*inserto superior*); SARA CHEN (*inserto inferior*)

sión del espacio-tiempo, las cualidades de las partículas elementales y muchas de las llamadas constantes físicas no están inscritas en las leyes de la física, sino que dimanan de "roturas de simetría". Así, por ejemplo, los teóricos piensan que el espacio alguna vez tuvo en nuestro universo nueve dimensiones, en pie de igualdad. Bien pronto en la historia cósmica, tres de ellas participaron en la expansión cósmica y se convirtieron en las tres dimensiones que observamos actualmente. Las otras seis son ahora inobservables, bien porque su tamaño ha persistido microscópico, con una topología similar a la de una rosquilla, o porque toda la materia está encerrada en una superficie tridimensional (una membrana, o "brana") en el espacio de nueve dimensiones.

Así, la simetría original entre las dimensiones se rompió. Las fluctuaciones cuánticas que causan la inflación caótica podrían inducir diferentes roturas de simetría en diferentes burbujas. Algunas se convertirían en tetradimensionales y otras contendrían dos en lugar de tres generaciones de quarks, o contarían con una constante cosmológica aún mayor que la de nuestro universo.

Otra manera de obtener un multiverso de Nivel II sería por medio de un ciclo de nacimiento y destrucción de universos. En un contexto científico, propuso la idea, en los años treinta, el físico Richard C. Tolman; la reelaboraron no hace mucho Paul J. Steinhardt, de la Universidad de Princeton, y Neil Turok, de la Universidad de Cambridge. La propuesta de Steinhardt y Turok, y los modelos relacionados con ella, involucran una segunda brana tridimensional paralela, entiéndase al pie de la letra, a la nuestra, sólo que desplazada a una dimensión superior. Ese universo paralelo no es realmente un universo separado del nuestro, porque interacciona con él. Pero el conjunto de universos —pasados, presentes y futuros— que estas branas crean formaría un multiverso, presumiblemente con una diversidad similar a la que produce la inflación caótica. Una idea propuesta por el físico Lee Smolin, del Instituto Perímetro de Waterloo, Ontario, comporta aún otro multiverso comparable en diversidad al del Nivel II, pero que muta y da lugar a nuevos universos por medio de agujeros negros y no gracias a la física de branas.

Aunque no podemos interaccionar con otros universos paralelos de Nivel II, los cosmólogos sí pueden inferir su presencia indirectamente, porque su existencia da cuenta de coincidencias inexplicadas en nuestro universo. Para dar una analogía, suponga que usted se registra en un hotel, le asignan la habitación 1967 y observa que coincide con el año de su nacimiento. Qué coincidencia, pensará quizá. Tras un momento de reflexión, sin embargo, concluirá que, al fin y al cabo, no es tan sorprendente. El hotel tiene cientos de habitaciones, y para empezar usted no tendría estas preocupaciones si le hubiesen asignado una con un número sin ninguna vinculación con su biografía. La lección es que, incluso aunque usted no supiese nada sobre hoteles, podría inferir la existencia de otras habitaciones para explicar la coincidencia.

Como ejemplo un poco más pertinente, considere la masa del Sol. La masa de una estrella determina su luminosidad, y conforme a la física básica, se puede calcular que la vida tal y como la conocemos en la Tierra sólo es posible si la masa del Sol cae en un estrecho intervalo de masas, entre $1{,}6 \times 10^{30}$ y $2{,}4 \times 10^{30}$ kilogramos. Si no, el clima de la Tierra sería más frío que el de hoy de Marte, o más caliente que en el Venus actual. La masa observada del Sol es $2{,}0 \times 10^{30}$ kilogramos. A primera vista, esta coincidencia de los valores de la masa habitable y la observada parece un golpe de suerte increíble. Las masas estelares van de 10^{29} a 10^{32} kilogramos; por lo tanto, si el Sol obtuvo su masa aleatoriamente, tendría solamente una pequeña probabilidad de caer en el rango habitable. Pero como en el ejemplo del hotel, cabe explicar esta coincidencia aparente partiendo de que existe una colectividad (en este caso, un conjunto de sistemas planetarios) y un efecto de selección (por fuerza, debemos vivir en un planeta habitable). Dichos efectos de selección, relacionados con el observador, se denominan "antrópicos", y aunque esta palabra suele desatar polémica, los físicos están de acuerdo en términos generales en que dichos efectos de selección no pueden ser ignorados al contrastar teorías fundamentales.

Lo que sirve para habitaciones de hotel y sistemas planetarios también es aplicable a los universos paralelos. La mayoría de los atributos determinados por rotura de simetría, por no decir todos, parecen estar ajustados finamente. Cambiar sus valores por cantidades modestas daría lugar a un universo cualitativamente diferente, en el cual probablemente no existiríamos. Si los protones fuesen un 0,2 por ciento más pesados, podrían desintegrarse en neutrones; los átomos se desestabilizarían. Si la fuerza electromagnética fuese un 4 por ciento más débil, no habría hidrógeno ni estrellas normales. Si la fuerza débil fuese mucho más débil, no existiría el hidrógeno; si fuese mucho más intensa, las supernovas no sembrarían el espacio interestelar con elementos pesados. Si la constante cosmológica fuese mucho mayor, el universo se habría desgajado antes de que hubiesen podido formarse las galaxias.

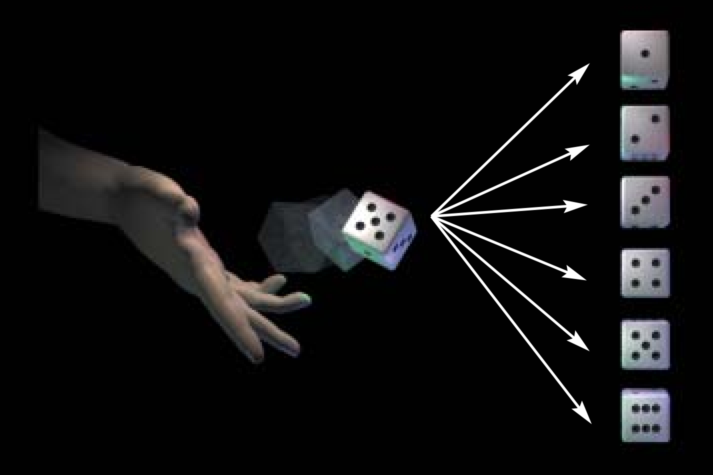
Aunque el grado de ajuste fino es todavía objeto de debate, estos ejemplos sugieren la existencia de universos paralelos con otros valores de las constantes físicas [*véase* "Exploración del universo", por Martin Rees; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2000]. El multiverso de Nivel II predice que los físicos nunca

El autor

MAX TEGMARK es profesor de física y astronomía en la Universidad de Pennsylvania, experto en analizar el fondo cósmico de microondas y la agregación de galaxias. Buena parte de su trabajo guarda relación con el concepto de universos paralelos: evaluar los elementos de juicio favorables a la infinitud del espacio y a la inflación cósmica, ahondar en el conocimiento de la decoherencia cuántica y estudiar la posibilidad de que la amplitud de las fluctuaciones del fondo de microondas, la dimensión del espacio-tiempo y las leyes fundamentales de la física puedan variar de un lugar a otro.

MULTIVERSO DE NIVEL III

La mecánica cuántica predice un número vasto de universos paralelos y amplía el concepto de "en otra parte". Dichos universos se encuentran en otra parte, no en el espacio ordinario, sino en un reino abstracto de todos los posibles estados. Cada manera de ser del mundo que pueda concebirse (dentro del ámbito de la mecánica cuántica) corresponde a un universo diferente. Los universos paralelos hacen notar su presencia en algunos experimentos de laboratorio, como los de interferencia de ondas y los de computación cuántica.

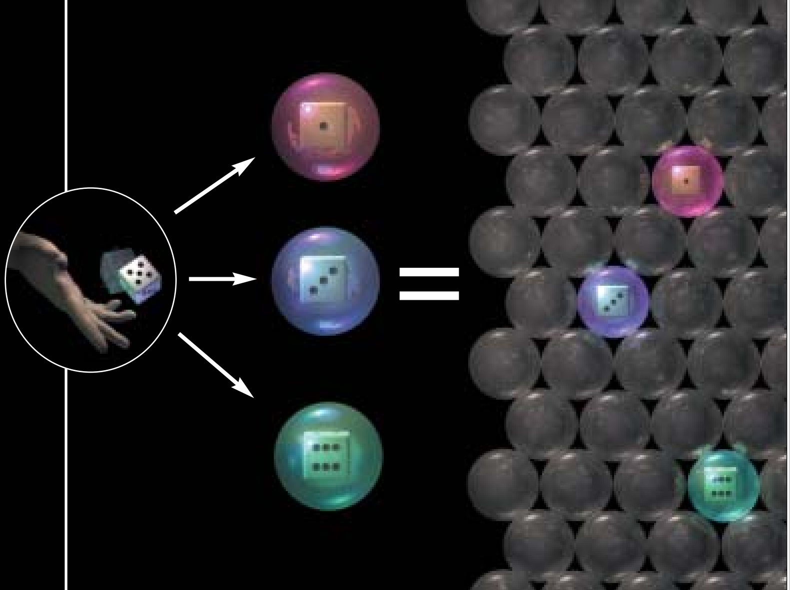


Dados cuánticos

Imagínese un dado ideal con una aleatoriedad puramente cuántica. Una vez arrojado, saldrá aleatoriamente un cierto valor. La mecánica cuántica, sin embargo, predice que salen todos los valores a la vez. Una manera de reconciliar estos puntos de vista contradictorios es concluir que salen diferentes valores en diferentes universos. En un sexto de los universos, sale el 1; en otro sexto, el 2, y así sucesivamente. Atrapados en un universo, podemos percibir solamente una fracción de la realidad cuántica completa.

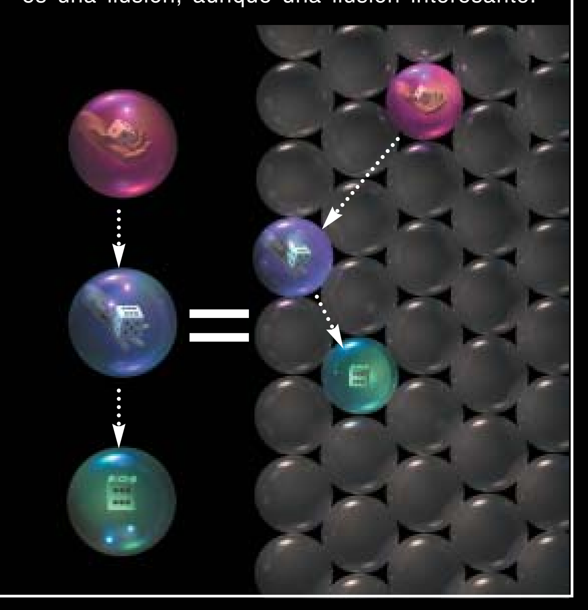
Ergodicidad

Según el principio de ergodicidad, los universos paralelos cuánticos son equivalentes a tipos más prosaicos de universos paralelos. Un universo cuántico se divide en el tiempo en universos múltiples (*izquierda*). Pero esos universos nuevos no son diferentes de los universos paralelos que ya existen en alguna otra parte del espacio —por ejemplo, en otros universos de Nivel I (*derecha*)—. La idea clave es que los universos paralelos, de cualquier tipo, encarnan diferentes maneras en que los acontecimientos podrían haberse desarrollado.



La naturaleza del tiempo

La mayoría piensa en el tiempo como si fuera una manera de describir los cambios. En un instante, la materia tiene cierta configuración, y un instante más tarde, otra (*izquierda*). El concepto de multiversos sugiere una concepción distinta. Si los universos paralelos contienen todas las posibles configuraciones de la materia (*derecha*), el tiempo es sólo una manera de poner todos esos universos en una secuencia. Los universos en sí son estáticos; el cambio es una ilusión, aunque una ilusión interesante.



ALFRED T. KAMAJIAN

alcanzarían a determinar los valores de esas constantes a partir de primeros principios. Sólo calcularán distribuciones de probabilidad para lo que esperan encontrar, tomando en consideración los efectos de selección. El resultado deberá ser tan genérico como se pueda mientras resulte compatible con nuestra existencia.

Nivel III: pluralidad de universos cuánticos

Los multiversos de Nivel I y Nivel II abarcan mundos paralelos que están lejos, más allá incluso del dominio de la astronomía. Pero el siguiente nivel de multiverso lo tenemos justo a nuestro lado. Emerge de la famosa, y polémica, interpretación de la mecánica cuántica llamada "de los muchos mundos", según la cual los procesos aleatorios cuánticos provocan la ramificación del universo en múltiples copias, una para cada resultado posible.

A principios del siglo XX, la teoría de la mecánica cuántica revolucionó la física con su explicación del reino de lo atómico, que no obedece las reglas clásicas de la mecánica de Newton. A pesar de sus evidentes éxitos, se mantiene un debate acalorado sobre su significado real. La teoría no especifica el estado del universo en términos clásicos —las posiciones y velocidades de las partículas—, sino por medio de un objeto matemático, la función de onda. Según la ecuación de Schrödinger, dicho estado evoluciona en el tiempo de manera, como dicen los matemáticos, "unitaria": la función de onda rota en un espacio abstracto de dimensión infinita, el "espacio de Hilbert". Aunque se describe a menudo a la mecánica cuántica como intrínsecamente aleatoria e incierta, la función de onda evoluciona de manera determinista. No tiene nada de aleatorio ni incierto.

La parte espinosa consiste en conectar esta función de onda con las observaciones. Muchas funciones de onda legítimas corresponden a situaciones que van contra la intuición, como un gato que está vivo y muerto al mismo tiempo, en una "superposición" de ambos estados. Para explicar estos extraños misterios, se introdujo ya en los años 20 un postulado que afirmaba que la función de onda "colapsaba", es decir, se reducía a algún resultado clásico concreto cada vez que alguien hacía una observación. Ese postulado tenía la virtud de explicar las observaciones, pero convirtió una teoría elegante y unitaria en tosca y no unitaria.

A lo largo de los años, muchos físicos han abandonado este punto de vista por el que elaboró en 1957 el estudiante de doctorado de Princeton Hugh Everett III. Mostró que el postulado del colapso es innecesario. La teoría cuántica no adulterada carece de contradicciones. Aunque predice que una realidad clásica se va dividiendo en superposiciones de muchas realidades clásicas, los observadores experimentan subjetivamente dicha división como una ligera aleatoriedad, cuyas probabilidades concuerdan con exactitud con las del viejo postulado del colapso. Esta superposición de mundos clásicos es el multiverso de Nivel III.

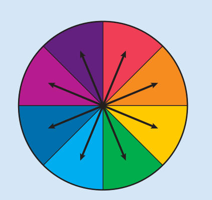
Sobre la interpretación de Everett de los muchos mundos se ha venido cavilando dentro y fuera de la física durante más de cuatro décadas. Pero resulta más fácil de comprender cuando se distingue entre dos maneras de ver una teoría física: la visión externa de un físico que estudia sus ecuaciones matemáticas, como un pájaro que contempla un paisaje desde las alturas, y la visión interna de un observador que vive en el mundo descrito por las ecuaciones, como una rana que habitase en el paisaje contemplado por el pájaro.

Desde la perspectiva del pájaro, el multiverso de Nivel III es simple. Sólo hay una función de onda. Evoluciona suavemente y de manera determinista en el tiempo, sin ningún tipo de división o paralelismo. El mundo cuántico abstracto descrito por esta función de onda que evoluciona contiene en sí un número vasto de historias clásicas paralelas, en división y agregación incesantes, así como algunos fenómenos cuánticos que no admiten una descripción clásica. Como la rana, los observadores perciben desde su punto de vista sólo una fracción minúscula de esa plena realidad. Pueden ver su propio universo de Nivel I, pero un proceso, la decoherencia, que imita el colapso sin dejar de respetar la unitariedad, les impide ver sus propias copias paralelas de Nivel III.

Cuando se pregunta algo a los observadores, y éstos toman una decisión súbita y dan una respuesta, los efectos cuánticos en sus cerebros engendran una superposición de resultados, tales como "sigue leyendo el artículo" y "deja de leer el artículo". Desde la perspectiva del pájaro, el acto de tomar una decisión causa que la persona se divida en copias: una que continúa leyendo y una que no lo hace. Desde el punto de vista de la rana, sin embargo, cada uno de esos dobles no tiene conciencia de los otros y percibe la ramificación como una ligera aleatoriedad: una cierta probabilidad de seguir leyendo o no.

Aunque resulte extraño, la misma situación ocurre exactamente incluso en el multiverso de Nivel I. Está claro que usted ha decidido continuar leyendo el artículo, pero uno de sus dobles en una galaxia lejana dejó la lectura después del primer párrafo. La única diferencia entre el Nivel I y el Nivel III es dónde viven sus dobles. En el Nivel I, viven en alguna otra parte del viejo y querido espacio tridimensional. En el Nivel III viven en otra rama cuántica del espacio de Hilbert de infinitas dimensiones.

La existencia del Nivel III depende de una suposición crucial: que la evolución temporal de la función de ondas es unitaria. Hasta ahora, los físicos experimentales no han encontrado ninguna desviación de la unitariedad. En los últimos decenios se ha ido confirmando la unitariedad en sistemas cada vez mayores, hasta en buckybolas de C60 y fibras ópticas kilométricas. Por lo que se refiere a la teoría, el descubrimiento de la decoherencia ha impulsado los argumentos favorables a la unitariedad [*véase* "Cien años de misterios cuánticos", por Max Tegmark y John Archibald Wheeler; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2001]. Algunos teóricos que trabajan en gra-



EL MISTERIO DE LA PROBABILIDAD

A medida que las teorías de multiverso ganan credibilidad, el incómodo problema de calcular probabilidades en física se convierte, de una molestia menor, en auténtica cruz. Si de verdad hay muchas copias idénticas de usted, la noción tradicional de determinismo se evapora. No podría calcular su futuro ni aunque tuviese conocimiento del estado completo del multiverso, ya que no hay manera de que usted determine cuál de esas copias es usted (todas piensan que lo son). No podría predecir, por lo tanto, más que probabilidades de lo que usted observaría. Si un resultado tuviese una probabilidad del 50 por ciento, significaría que la mitad de los observadores lo observarían.

Por desgracia, no es fácil calcular qué fracción de los infinitos observadores percibe qué. La respuesta depende del orden en que usted los cuente. Una analogía: la fracción de los enteros pares es del 50 por ciento si los ordenamos numéricamente (1, 2, 3, 4,...), pero se aproxima al 100 por cien si los ordenamos dígito a dígito, del modo que el procesador de textos lo haría (1, 10, 100, 1000,...). Cuando los observadores residen en universos desconectados, no existe ningún modo natural y evidente de ordenarlos: hay que muestrear los diferentes universos con algunos pesos estadísticos, conocidos por los matemáticos como “medidas”.

Este problema aparece de una manera suave y abordable en el Nivel I, se endurece en el Nivel II, ha originado mucho debate en el Nivel III y es horrible en el Nivel IV. En el Nivel II, por ejemplo, Alexander Vilenkin, de la Universidad Tufts, y otros han publicado predicciones de las distribuciones de probabilidad de varios parámetros cosmológicos. Opinan que los universos paralelos diferentes con diferentes factores de inflación deberían tener pesos estadísticos proporcionales a su volumen. Por otro lado, cualquier matemático dirá que 2 × infinito = infinito, de manera que no tiene sentido objetivo alguno decir que un universo infinito que se ha expandido por un factor dos se ha vuelto mayor. Además, un universo finito con la topología de un toro es equivalente a un universo perfectamente periódico con volumen infinito, tanto desde el punto de vista matemático del pájaro como desde el punto de vista de la rana, correspondiente a un observador dentro de él. Entonces, ¿por qué debiera su volumen infinitamente menor darle un peso estadístico cero? Después de todo, incluso en el multiverso de Nivel I los volúmenes de Hubble empiezan a repetirse (aunque en un orden aleatorio, no periódicamente) después de unos 10 elevado a 10^{118} metros.

Por si le parece poca dificultad, considere el problema de asignar pesos estadísticos a diferentes estructuras matemáticas en el Nivel IV. El hecho de que nuestro universo parezca hasta cierto punto simple ha llevado a muchos a proponer que la medida correcta incluye la complejidad.

vedad cuántica han cuestionado la unitariedad. Cabe temer que los agujeros negros que se evaporan destruyan información; se trataría de un proceso no unitario. Pero un gran avance de la teoría de cuerdas, la “correspondencia AdS/CFT”, sugiere que la propia gravedad cuántica es unitaria. De resultar cierto, los agujeros negros no destruirían información, sino que, simplemente, la transmitirían a alguna otra parte.

Si la física es unitaria, la explicación al uso sobre el comportamiento de las fluctuaciones cuánticas en el comienzo de la gran explosión deberá cambiar. Esas fluctuaciones no generaron en tal caso condiciones iniciales aleatorias, sino una superposición cuántica de todas las posibles condiciones iniciales, que coexistieron simultáneamente. La decoherencia provocó más tarde que esas condiciones iniciales se comportasen clásicamente en las diferentes ramas cuánticas. He aquí el punto crucial: la distribución de resultados en diferentes ramas cuánticas en un volumen de Hubble dado (Nivel III) es idéntica a la distribución de resultados en diferentes volúmenes de Hubble dentro de una sola rama cuántica (Nivel I). Esta propiedad de las fluctuaciones cuánticas se conoce en mecánica estadística como ergodicidad.

El mismo razonamiento puede aplicarse al Nivel II. El proceso de rotura de simetría no produjo un resultado único, sino una superposición de todos los resultados, que rápidamente fueron por diferentes caminos. Por lo tanto, si las constantes físicas, la dimensión del espacio y demás pueden variar entre ramas cuánticas paralelas en el Nivel III, también variarán entre los universos paralelos de Nivel II.

En otras palabras, el multiverso de Nivel III no añade nada nuevo más allá del Nivel I y el Nivel II; sólo aporta más copias indistinguibles de los mismos universos: las mismas viejas historias repitiéndose una y otra vez en otras ramas cuánticas. El apasionado debate sobre la teoría de Everett parece, pues, acabar en un gran anticlímax, con el descubrimiento de multiversos menos controvertidos (Niveles I y II), que son igualmente grandes.

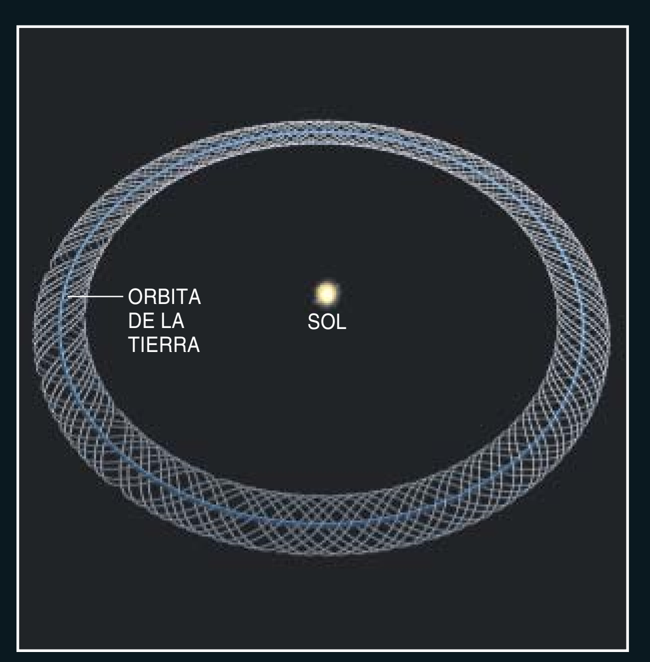
Huelga decir que las implicaciones son profundas, y sólo se está empezando a explorarlas. Considérense, por ejemplo, las ramificaciones de la respuesta a una vieja pregunta: ¿crece exponencialmente el número de universos con el tiempo? No, por sorprendente que parezca. Desde el punto de vista del pájaro, sólo hay un universo cuántico. Desde el punto de vista de la rana, lo que cuenta es el número de universos distinguibles en un instante dado —es decir, el número de volúmenes de Hubble diferentes—. Imagínese moviendo planetas a nuevas posiciones aleatorias, imagínese haberse casado con alguien diferente, y así sucesivamente. A nivel cuántico, hay 10 elevado a 10^{118} universos con temperaturas por debajo de los 10^8 kelvin. Aunque se trata de un guarismo enorme, es finito.

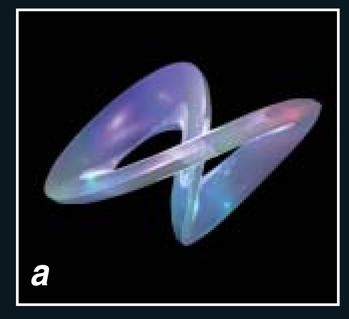
Desde la óptica de la rana, la evolución de la función de onda corresponde a un deslizamiento sin fin,

SARA CHEN

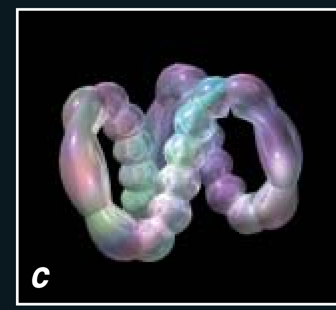
MULTIVERSO DE NIVEL IV

El tipo final de universo paralelo destapa plenamente el reino de la posibilidad. Los universos pueden diferir no sólo en posición, propiedades cosmológicas o estado cuántico, sino también en las leyes de la física. Existiendo fuera del espacio y del tiempo, son casi imposibles de representar. Hemos de pensar en ellos de forma abstracta, como esculturas estáticas que representan la estructura matemática de las leyes físicas que los gobiernan. Piense, como ejemplo, en un universo simple: la Tierra, la Luna y el Sol, regidos por las leyes de Newton. A un observador objetivo este universo le parecerá un anillo circular (la órbita de la Tierra promediada en el tiempo) sobre el que se enrolla un trenzado (la órbita de la Luna alrededor de la Tierra). Otras formas encarnarán otras leyes de la física (*a, b, c, d*). Este paradigma resuelve varios problemas relativos a los fundamentos de la física.











BRYAN CHRISTIE DESIGN (*izquierda*); ALFRED T. KAMAJIAN (*a–d*)

de uno de esos 10 elevado a 10^{118} estados a otro. Ahora está usted en el universo A, aquel en el que lee esta frase. Ahora se halla en el universo B, aquel en el cual lee esta otra frase. En otras palabras, el universo B tiene un observador idéntico al del universo A, con la salvedad de que en sus recuerdos, hay un instante más. Todos los posibles estados existen en cualquier instante, así que el paso del tiempo puede radicar en el observador: una idea desarrollada por David Deutsch, de la Universidad de Oxford, Julien Barbour y otros. El marco del multiverso puede resultar esencial para comprender la naturaleza del tiempo.

Nivel IV: otras estructuras matemáticas

Las condiciones iniciales y constantes físicas en los multiversos de Nivel I, Nivel II y Nivel III pueden variar, pero las leyes fundamentales que gobiernan la naturaleza permanecen. ¿Por qué vamos a pararnos ahí? ¿Por qué no consentimos que las mismas leyes varíen? ¿Un universo que obedece las leyes de la física clásica, sin efectos cuánticos? ¿Un tiempo que transcurre en intervalos discretos, como en los ordenadores, en lugar de ser continuo? ¿Un universo que no sea más que un dodecaedro vacío? En el multiverso de Nivel IV existen todas esas realidades alternativas.

Una pista de que tal multiverso sea algo más que una mera fantasía nos la ofrece la estrecha relación entre los mundos del razonamiento abstracto y la realidad observada. Las ecuaciones, y de modo más general, las estructuras matemáticas —los números, vectores y objetos geométricos— describen el mundo con notable verosimilitud. En una célebre lección de 1959, Eugene P. Wigner defendió que "la enorme utilidad de las matemáticas en las ciencias naturales es algo que bordea lo misterioso". Inversamente, las estructuras matemáticas tienen un aire de realidad que sobrecoge. Satisfacen un criterio central de existencia objetiva: son las mismas las estudie quien las estudie. Un teorema es verdadero lo demuestre un ser humano, un ordenador o un delfín inteligente. Civilizaciones extraterrestres pensantes hallarían las mismas estructuras matemáticas que nosotros. Del mismo modo, los matemáticos, por lo común, no dicen que crean, sino que descubren estructuras matemáticas.

Hay dos paradigmas defendibles, diametralmente opuestos, para entender la correspondencia entre matemáticas y física, una dicotomía que se remonta a Platón y Aristóteles. Según el paradigma aristotélico, la realidad física es fundamental y el lenguaje matemático, una mera aproximación útil. Según el paradigma platónico, la estructura matemática es la verdadera realidad y los observadores la perciben de manera imperfecta. En otras palabras, los dos paradigmas discrepan en qué perspectiva de las leyes físicas es más fundamental, la de la rana o la del pájaro. El paradigma aristotélico prefiere la perspectiva de la rana, mientras que el platónico se queda con la del ave.

Desde niños, desde mucho antes de que hubiésemos siquiera oído hablar de matemáticas, se nos adoctrinó en el paradigma aristotélico. El punto de vista platónico es un gusto adquirido. Los físicos teóricos modernos tienden a ser platónicos; sospechan que las matemáticas describen tan bien el universo porque el propio universo es matemático. Luego la física entera es en sí un problema de matemáticas: un matemático con una inteligencia y unos recursos ilimitados podría en principio calcular la perspectiva de la rana; es decir, calcular qué observadores conscientes de sí mismos contiene el universo, qué perciben y qué lenguajes se inventan para describirse sus percepciones unos a otros.

Una estructura matemática constituye un ente abstracto e inmutable que existe fuera del espacio y del tiempo. Si la historia fuese una película, la estructura correspondería, no a un solo fotograma, sino a la cinta completa. Considere, por ejemplo, un mundo hecho de partículas puntuales que se muevan en el espacio tridimensional. En el espacio-tiempo tetradimensional —la perspectiva del pájaro— esas trayectorias de las partículas parecen una maraña de espaguetis. Si la rana ve una partícula moviéndose con velocidad constante, el pájaro ve un espagueti recto. Si la rana ve un par de partículas en órbita, el pájaro ve dos espaguetis entrelazados como una hélice doble. Para la rana, el mundo está descrito por las leyes de Newton sobre el movimiento y la gravitación. Para el pájaro, está descrito por la geometría de la pasta, una estructura matemática. La rana misma es un grueso manojo de pasta, cuyo complejo entrelazado corresponde a un cúmulo de partículas que almacenan y procesan información. Nuestro universo es mucho más complicado que este ejemplo, y los científicos no saben todavía a qué estructura matemática corresponde, en la hipótesis de que corresponda a alguna.

El paradigma platónico suscita la pregunta de por qué el universo es como es. Para un aristotélico la pregunta carece de sentido: el universo simplemente es. Pero un platónico no puede evitar preguntarse por qué no podría haber sido diferente. Si el universo es en sí matemático, entonces ¿por qué sólo se escogió una estructura matemática entre muchas para describir un universo? Parece que una asimetría fundamental forma parte inseparable de las raíces mismas de la realidad.

Para evitar esta aporía he sugerido que existe simetría matemática completa: que todas las estructuras matemáticas existen también físicamente. Toda estructura matemática corresponde a un universo paralelo. Los elementos de este multiverso no residen en el mismo sitio, sino que existen fuera del espacio y el tiempo. La mayoría se encuentran vacíos de observadores. Esta hipótesis puede asociarse a una forma radical de platonismo que asevera que las estructuras matemáticas del mundo de las ideas de Platón o el panorama mental del matemático Rudy Rucker, de la Universidad estatal de San José, existen en sentido físico. Es similar a lo que John D. Barrow, de la Universidad de Cambridge, llama "π en el cielo", lo que Robert Nozick, de la Universidad de Harvard, denominó principio de fecundidad y lo que David K. Lewis, de Princeton, consideraba realismo modal. El multiverso de Nivel IV cierra la jerarquía de multiversos, porque cualquier teoría física fundamental y coherente consigo misma puede formularse como una estructura matemática.

La hipótesis del multiverso de Nivel IV hace predicciones contrastables. Lo mismo que el Nivel II, involucra una colectividad (en este caso, el abanico completo de estructuras matemáticas) y efectos de selección. A medida que los matemáticos continúan categorizando estructuras matemáticas, deberían encontrar que la estructura que describe a nuestro mundo es la más genérica posible y compatible con nuestras observaciones. Análogamente, nuestras futuras observaciones tendrían que ser las más genéricas entre las compatibles con nuestras observaciones pasadas, y nuestras observaciones pasadas tendrían que ser las más genéricas entre las compatibles con nuestra existencia.

Cuantificar el significado de "genérico" no resulta fácil. Su investigación apenas ha echado a andar. Pero una característica chocante y alentadora de las estructuras matemáticas es que las propiedades de simetría e invariancia responsables de la simplicidad y el orden de nuestro universo tienden a ser genéricas, tienden a ser la regla, no la excepción. Las estructuras matemáticas cuentan con esas propiedades por defecto; hay que añadir complicados axiomas adicionales para eliminarlas.

¿Qué dice Occam?

Las teorías científicas de los universos paralelos forman, pues, una jerarquía de cuatro niveles. En ellos los universos van siendo cada vez más diferentes del nuestro. Pueden tener condiciones iniciales (Nivel I), constantes físicas y partículas (Nivel II) y leyes físicas (Nivel IV) que difieran de las que caracterizan al nuestro. Resulta curioso que el Nivel III sea el que haya levantado mayor polvareda en los pasados decenios, teniendo en cuenta que es el único que no añade ningún tipo cualitativamente nuevo de universo.

En la próxima década, mediciones cosmológicas mejoradas del fondo de microondas y de la distribución de materia a gran escala corroborarán o refutarán el Nivel I porque precisarán cuáles son la curvatura y la topología del espacio. También ex-

plorarán el Nivel II y pondrán a prueba la teoría de la inflación caótica eterna. Los progresos en astrofísica, así como en física de altas energías, deberían también aclarar el alcance del ajuste fino en las constantes físicas, debilitando o reforzando los argumentos a favor del Nivel II.

Si los esfuerzos actuales por construir ordenadores cuánticos tienen éxito, supondrán un aval añadido a favor del Nivel III, ya que, en esencia, explotarían el paralelismo del multiverso de Nivel III para la computación en paralelo. Los físicos experimentales están también buscando indicios de la violación de la unitariedad, que descartaría el Nivel III. Finalmente, el éxito o el fracaso del gran reto de la física moderna —unificar la relatividad general y la teoría cuántica de campos— decantará las opiniones sobre el Nivel IV. O encontraremos una estructura matemática que corresponde exactamente a nuestro universo, o nos daremos de bruces contra un límite a la irrazonable efectividad de las matemáticas y tendremos que abandonar este nivel.

¿Debe usted creer en universos paralelos? Hay dos argumentos principales en su contra: que son un derroche y que son extraños. El primer argumento sostiene que las teorías de multiverso son vulnerables a la navaja de Occam porque toman como premisa la existencia de mundos que jamás podremos observar. ¿Por qué iba a ser la naturaleza tan derrochadora como para complacerse en la opulencia de una infinidad de mundos diferentes? Sin embargo, puede dársele la vuelta a este argumento y usarlo *a favor* de un multiverso.

¿Qué derrocharía la naturaleza? Ciertamente no espacio, masa o átomos; el nada polémico multiverso de Nivel I ya contiene una cantidad infinita de los tres y, por lo tanto, ¿a quién le importaría que la naturaleza derrochase un poco más? El verdadero problema se esconde en la aparente pérdida de sencillez. Al escéptico le perturba tanta información necesaria para especificar cada universo no visto.

Pero un conjunto entero es a menudo mucho más simple que cualquiera de sus miembros. Ese principio se puede formular de manera más formal con la noción de contenido de información algorítmico. El contenido de información algorítmico de un número consiste, a grandes rasgos, en la longitud del programa de ordenador más corto que produce dicho número por resultado. Piense en el conjunto de los enteros. ¿Qué es más simple, el conjunto entero o un mero número? Ingenuamente, usted podría pensar que un número es más simple; sin embargo, un programa de ordenador trivial genera el conjunto entero, mientras que un solo número puede ser enormemente largo. Por consiguiente, el conjunto entero es más simple.

Del mismo modo, el conjunto de todas las soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein es más simple que una solución específica. Aquél se describe mediante unas pocas ecuaciones, mientras que ésta requiere la especificación de grandes cantidades de condiciones iniciales sobre alguna hipersuperficie. La lección es que la complejidad se incrementa cuando nos restringimos a un elemento particular en una colectividad, perdiendo así la simetría y la simplicidad inherentes a la totalidad de los elementos tomados en su conjunto.

En este sentido, los multiversos de nivel más elevado son más simples. Yendo desde nuestro universo al multiverso de Nivel I eliminamos la necesidad de especificar condiciones iniciales; subiendo al Nivel II eliminamos la necesidad de especificar las constantes físicas; con el multiverso de Nivel IV no hay que especificar nada en absoluto. La opulencia de la complejidad radica en las percepciones subjetivas de los observadores: la perspectiva de la rana. Desde la perspectiva del pájaro, el multiverso no podría ser más simple.

La objeción acerca de la extrañeza es estética, no científica; sólo adquiere sentido dentro de la visión aristotélica del mundo. Y ¿qué esperábamos? Cuando planteamos una pregunta profunda sobre la naturaleza de la realidad, ¿no habremos de esperar una respuesta que parezca extraña? La evolución nos ha dotado de intuición para esa física cotidiana de la que dependía la supervivencia de nuestros remotos antepasados. Cuando nos aventuramos más allá del mundo cotidiano, deberíamos esperar que nos parezca estrafalario.

Una característica común de los cuatro niveles de multiverso es que la más simple y tal vez más elegante de las teorías contiene, por defecto, universos paralelos. Para negar la existencia de tales universos hay que complicar la teoría añadiendo procesos que no tienen apoyo experimental y parten de postulados *ad hoc*: espacio finito, colapso de la función de onda y asimetría ontológica. Nuestro juicio se reduce por tanto a qué encontramos más derrochador o inelegante: muchos mundos o muchas palabras. Tal vez nos acostumbremos gradualmente a los extraordinarios caminos de nuestro cosmos, y descubramos que su extrañeza forma parte de su encanto.

Bibliografía complementaria

WHY IS THE CMB FLUCTUATION LEVEL 10^{-5}? Max Tegmark y Martin Rees en *Astrophysical Journal*, vol. 499, n.º 2, págs. 526-532; 1 de junio, 1988.

IS “THE THEORY OF EVERYTHING” MERELY THE ULTIMATE ENSEMBLE THEORY? Max Tegmark en *Annals of Physics*, vol. 270, n.º 1, págs. 1-51; 20 de noviembre, 1998.

MANY WORLDS IN ONE. Jaume Garriga y Alexander Vilenkin en *Physical Review*, vol. D64, n.º 043511; 26 de julio, 2001.

OUR COSMIC HABITAT. Martin Rees. Princeton University Press, 2001.

INFLATION, QUANTUM COSMOLOGY AND THE ANTHROPIC PRINCIPLE. Andrei Linde en *Science and Ultimate Reality: From Quantum to Cosmos*. Dirigido por J. D. Barrow, P. C. W. Davies y C. L. Harper. Cambridge University Press, 2003.



Escuchar colores, saborear formas

El análisis de personas con sinestesia —individuos cuyas percepciones sensoriales se mezclan entre sí— proporciona información muy valiosa para comprender la organización y las funciones del cerebro humano

Vilayanur S. Ramachandran y Edward M. Hubbard

Cuando Matías Blázquez prepara hamburguesas con sus manos, experimenta un intenso sabor amargo. Esmerelda Juárez percibe su entorno de un color azulado si escucha un "do" al piano; el resto de las notas le evocan distintos colores. Las teclas de su piano están codificadas mediante colores para que, aprovechando su peculiar facultad, progrese en la ejecución de piezas musicales. Ante números impresos en negro, Colomán Arteche los ve de diferentes colores. Blázquez, Juárez y Arteche pertenecen al reducido grupo de personas que padecen sinestesia. Experimentan la vida cotidiana de forma extraordinaria y parecen habitar en un mundo misterioso, a medio camino entre la fantasía y la realidad. Para ellos los sentidos —tacto, gusto, oído, vista y olfato— no permanecen separados, sino mezclados.

La ciencia se acercó por vez primera a la sinestesia en 1880, año en que Francis Galton, primo de Charles Darwin, publicó un artículo sobre la misma en *Nature*. Pero quienes se siguieron ocupando del fenómeno, la minusvaloraban por considerarla una impostura o resultado del abuso de drogas (el LSD y la mescalina producen efectos similares); a lo sumo, se trataría de una rareza singular.

Desde hace unos cuatro años, sin embargo, nuestro grupo investigador —entre otros— comenzó a descubrir procesos cerebrales que podrían explicar la sinestesia. Durante el estudio también hallamos nuevas claves para comprender algunos de los aspectos más misteriosos de la mente humana, como la aparición del pensamiento abstracto, la metáfora y, quizás, el lenguaje.

A tenor de la explicación al uso, las personas sinestésicas se limitan a rememorar y asociar experiencias vividas en la infancia. En coherencia con ello, un individuo que al observar el número 5 lo ve de color rojo pese a estar impreso en negro, habría jugado de niño con figuras imanadas, entre las que había un 5 de color rojo y un 6 de color verde, por ejemplo. Pero tal hipótesis no explica por qué sólo algunas personas retienen en su memoria recuerdos sensoriales tan intensos. Se puede *pensar* en la sensación de frío cuando se observa una fotografía de un cubito de hielo, pero no se sentirá frío, cualesquiera que hayan sido las vivencias relacionadas con la nieve y el frío experimentadas durante la adolescencia.

Para otros, los sinestésicos emplean un lenguaje metafórico, cuando hablan de una nota do "roja" o del sabor "puntiagudo" del pollo, del mismo modo que las personas normales califican un queso como "fuerte" o dicen que un vestido es "chillón". Nuestro lenguaje ordinario está plagado de metáforas relacionadas con los sentidos. Los sinestésicos estarían especialmente dotados para ello.

En 1999 nuestro grupo comenzó a investigar si la sinestesia constituía una experiencia genuinamente sensorial. Esta cuestión, sencilla en apariencia, se ha resistido a los estudiosos durante decenios. De entrada, por ser lo natural, preguntamos directamente a los propios pacientes: "¿Lo reconoce como un recuerdo o ve el color como si lo tuviera delante?". No obtuvimos resultados satisfactorios. Aunque varios respondieron "Lo veo perfectamente", la reacción mayoritaria era: "En cierta manera, lo veo y no lo veo". O también: "No, no es como un recuerdo. Veo el número en rojo pero sé que no lo es, sé que es negro. Así que supongo que debe tratarse de un recuerdo".

Para determinar si una experiencia guarda relación directa con la percepción, la psicología emplea el test de segregación. Si se observa un conjunto de líneas en el que las inclinadas se hallan repartidas en un bosque

DAVID EMMITE

de verticales, las líneas inclinadas destacan sobremanera. Resulta harto sencillo separarlas del fondo y agruparlas para formar, por ejemplo, un triángulo. Algo similar sucederá si observamos un fondo de puntos verdes y se nos pide que detectemos las figuras rojas; éstas destacarán. Pero un conjunto de "doses" (2) negros diseminados entre "cincos" (5) del mismo color resultarán casi indistinguibles. Cuesta discernir los doses de los cincos sin proceder a una inspección número a número, aunque cada figura, en sí, difiera de la contigua tanto como una línea inclinada respecto de una vertical. Podríamos concluir, pues, que sólo determinadas características primitivas o elementales, así el color y la orientación de las líneas, permiten una distinción inmediata. Con otras formas más complejas, los números por ejemplo, no sucede lo mismo.

¿Qué ocurriría si mostráramos la representación de números impresos en negro a un grupo de sinestésicos que percibiesen los cincos de color rojo y los doses de color verde? Distribuimos los doses (2) de suerte tal que, en el cuadro de números, dibujaran un triángulo. Si la sinestesia fuera un fenómeno genuinamente sensorial, los individuos no tendrían dificultades en identificar el triángulo, ya que para ellos los números estarían teñidos de color.

Al realizar estos tests de segregación con voluntarios, el resultado no pudo ser más elocuente. A diferencia de las personas normales, los sinestésicos distinguieron la figura formada por el grupo de números en un 90 por ciento de los casos (exactamente igual que los individuos normales cuando los números aparecen coloreados). Estos resultados demuestran que los colores inducidos son de carácter sensorial y que los sinestésicos no fingen. En otro ensayo, de resultado sorprendente, colocamos ante una pantalla de ordenador a un sinestésico que percibía el número cinco de color rojo: no podía distinguir una variación de color de negro a rojo del número hasta que aplicábamos un tono encarnado intenso; pero detectaba inmediatamente el cambio si añadíamos un tinte verde.

Procesamiento visual

La confirmación de la realidad de la sinestesia plantea un nuevo interrogante: ¿por qué experimentan ciertas personas este extraño fenómeno? Nuestros ensayos nos inclinan a respaldar la idea de que en tales sujetos se produce un entrecruzamiento de conexiones cerebrales. La hipótesis se había postulado unos 100 años antes. Nosotros hemos avanzado un paso más: hemos identificado en qué zonas del cerebro y de qué modo se realiza dicho entrecruzamiento.

La comprensión de los factores neurobiológicos implicados requiere familiarizarse con el procesamiento de la información visual en el cerebro. Tras la llegada de la luz reflejada de un objeto a los conos del ojo (receptores del color), las señales neuronales de la retina se transmiten al área 17, en el lóbulo occipital. Allí, la imagen se procesa en el interior de agrupaciones locales, descomponiéndola en atributos simples: color, movimiento, forma y profundidad. Posteriormente, la información sobre cada una de dichas características se reenvía y distribuye por diversas regiones de los lóbulos temporal y parietal. La concerniente al color se dirige al área V4, sita en la circunvolución fusiforme del lóbulo temporal. Desde aquí, viaja a áreas que se encuentran a un nivel superior en la jerarquía de los centros del color, incluida la región inmediata a TPO (zona de asociación de los lóbulos *t*emporal, *p*arietal y *o*ccipital). Estas áreas superiores pudieran intervenir en aspectos más depurados del procesamiento del color. Explicarían, por ejemplo, que las hojas nos parezcan tan verdes al anochecer como al mediodía, a pesar de que la combinación de longitudes de onda reflejadas desde ellas sea muy diferente.

También la computación numérica transcurre por etapas. Uno de los pasos iniciales tiene lugar en la circunvolución fusiforme, donde se representa la forma de los números; un paso posterior se da en la circunvolución angular, parte de la zona TPO implicada en el análisis de conceptos numéricos como ordinalidad (secuencia) y cardinalidad (cantidad). (Si la circunvolución angular está dañada por un accidente cerebrovascular o un tumor, el paciente puede identificar números, pero no dividir o restar. La capacidad de multiplicación suele permanecer intacta, por tratarse de un proceso aprendido de memoria.) Estudios por procesamiento de imágenes cerebrales realizados en humanos apuntan a que la representación visual de letras o números (grafemas) activa células de la circunvolución fusiforme, mientras que los sonidos de las sílabas (fonemas) son procesados en zonas superiores, de nuevo en las cercanías de la zona TPO.

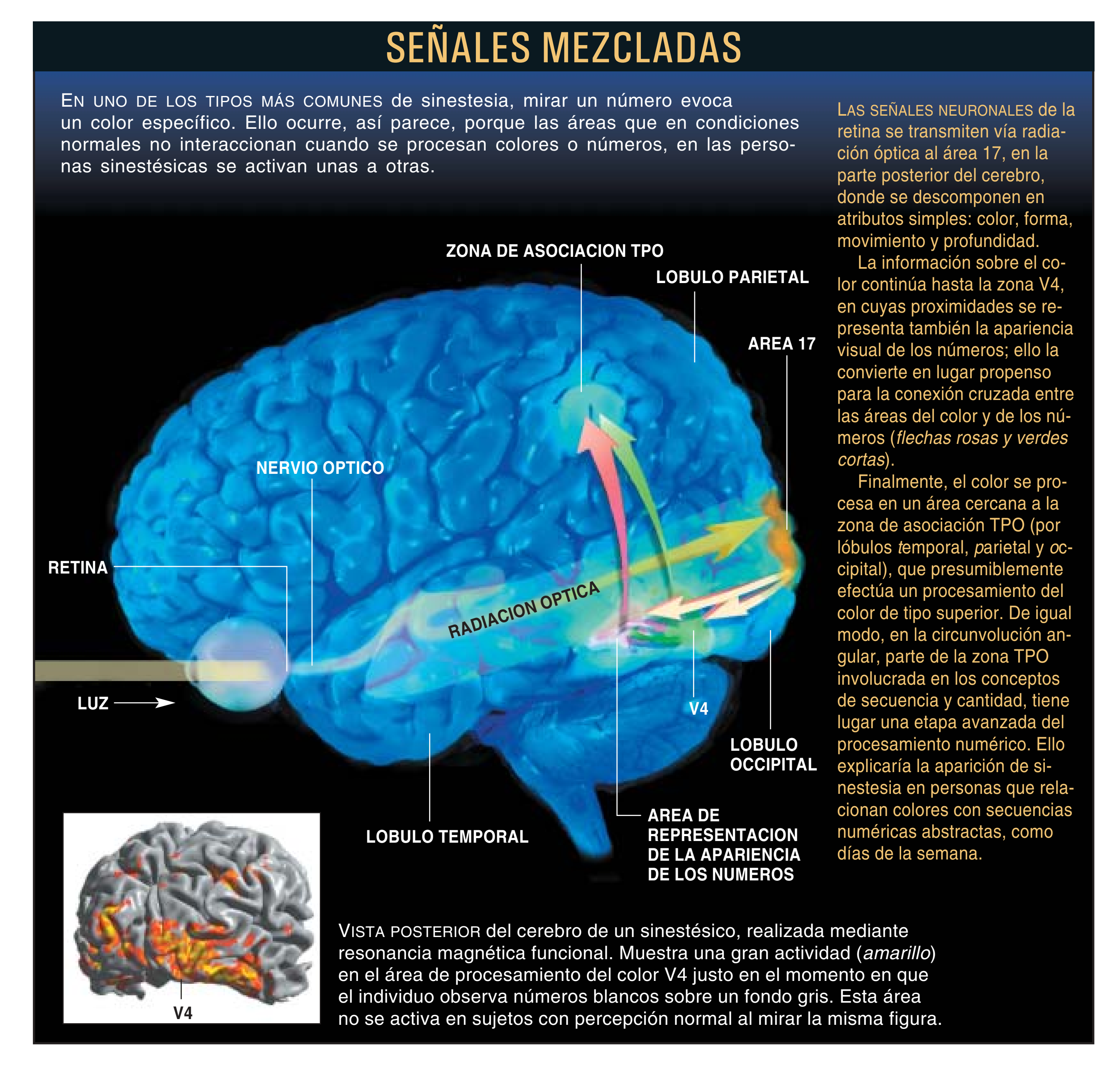
Debido a que tanto los colores como los números se procesan inicialmente en la circunvolución fusiforme y, luego, en la proximidad de la circunvolución angular, sospechamos que la sinestesia de tipo número-color podría deberse a un entrecruzamiento entre las conexiones del área V4 y del área de representación numérica (ambas en el seno de la circunvolución fusiforme)

Resumen/*Sinestesia*

- Sinestesia (del griego, *syn*, junto, y *aisthesis*, sensación) es un fenómeno por el que ciertas personas, en lo demás normales, experimentan la fusión de dos o más sentidos.
- Durante decenios se consideró una ofuscación o una combinación de recuerdos. Se ha demostrado que se trata de una condición real. Quizá tenga su origen en la activación cruzada, según la cual dos áreas del cerebro, que en situaciones normales se hallan separadas entre sí, se inducen actividad mutuamente.
- Al paso que la ciencia explora los mecanismos implicados en la aparición de la sinestesia, se va conociendo la forma en que el cerebro procesa la información de los sentidos y la emplea para establecer conexiones abstractas entre estímulos sensoriales sin aparente relación entre sí.

SEÑALES MEZCLADAS

EN UNO DE LOS TIPOS MÁS COMUNES de sinestesia, mirar un número evoca un color específico. Ello ocurre, así parece, porque las áreas que en condiciones normales no interaccionan cuando se procesan colores o números, en las personas sinestésicas se activan unas a otras.



LAS SEÑALES NEURONALES de la retina se transmiten vía radiación óptica al área 17, en la parte posterior del cerebro, donde se descomponen en atributos simples: color, forma, movimiento y profundidad.

La información sobre el color continúa hasta la zona V4, en cuyas proximidades se representa también la apariencia visual de los números; ello la convierte en lugar propenso para la conexión cruzada entre las áreas del color y de los números (*flechas rosas y verdes cortas*).

Finalmente, el color se procesa en un área cercana a la zona de asociación TPO (por lóbulos *t*emporal, *p*arietal y *o*ccipital), que presumiblemente efectúa un procesamiento del color de tipo superior. De igual modo, en la circunvolución angular, parte de la zona TPO involucrada en los conceptos de secuencia y cantidad, tiene lugar una etapa avanzada del procesamiento numérico. Ello explicaría la aparición de sinestesia en personas que relacionan colores con secuencias numéricas abstractas, como días de la semana.

VISTA POSTERIOR del cerebro de un sinestésico, realizada mediante resonancia magnética funcional. Muestra una gran actividad (*amarillo*) en el área de procesamiento del color V4 justo en el momento en que el individuo observa números blancos sobre un fondo gris. Esta área no se activa en sujetos con percepción normal al mirar la misma figura.

CAROL DONNER (*Ilustración*); GEOFF BOYNTON INSTITUTO SALK DE ESTUDIOS BIOLOGICOS Y VILAYANUR S. RAMACHANDRAN Y EDWARD M. HUBBARD (*inserto*)

o entre el área superior del color y la de conceptos numéricos (ambas en la zona TPO). Otras variantes más exóticas de sinestesia pudieran venir suscitadas por entrecruzamientos similares entre diferentes regiones responsables del procesamiento de informaciones sensoriales. El hecho de que el centro auditivo, en el lóbulo temporal, se encuentre cercano al área superior del cerebro que recibe las señales del color de la zona V4 podría explicar la sinestesia sonido-color. De manera similar, la "degustación del tacto" de Matías Blázquez ocurriría como efecto de un entrecruzamiento entre la corteza gustativa (la ínsula en concreto) y una parte de la corteza adyacente, en la que se procesa el tacto captado por las manos.

Aceptado que el origen de la sinestesia reside en el entrecruzamiento neuronal, cabe preguntarse por qué ocurre. Sabemos que se trata de una afección de agregación familiar. Posee, pues, un componente genético. Posiblemente sea una mutación la causante de la aparición de conexiones entre áreas del cerebro que, por norma, están segregadas entre sí. O quizá dicha mutación evite la interrupción de conexiones preexistentes entre áreas que no se hallan conectadas a menudo. El hecho de que la mutación se declare (es decir, provoque sus efectos) en unas áreas del cerebro y no otras, explicaría por qué algunos sinestésicos mezclan colores y números, mientras otros ven colores cuando escuchan fonemas o notas musicales. Las personas que padecen un tipo de sinestesia son más propensas a padecer otro, lo que confiere aún mayor credibilidad a esta tesis.

En un principio pensábamos que el entrecruzamiento era de tipo físico. Pero comprobamos que la sinestesia podía darse también si el



número de conexiones entre áreas fuese normal y, en cambio, se hallara desequilibrado el balance de sustancias químicas que cursaban entre regiones. Por ello, preferimos hablar de activación cruzada. Ciertas regiones cerebrales colindantes a menudo inhiben mutuamente su actividad. Un desequilibrio químico tal que minimice dicha inhibición —bloqueando, por ejemplo, la acción de un neurotransmisor inhibidor o impidiendo la síntesis de un inhibidor— provocaría que la actividad en un área despertara la actividad en otra vecina. Dicha activación cruzada podría, en teoría, transcurrir entre áreas muy distantes, originando algunas de las formas menos comunes de sinestesia.

Otros experimentos reforzaron la tesis de la activación cruzada. De ésos, algunos permiten explicar las diferentes variantes de sinestesia. Uno de ellos aprovecha el fenómeno visual "de multitud". Si se observa con detenimiento un pequeño signo positivo en una imagen que también contiene un número cinco (5) en un extremo, será fácil distinguirlo, sin necesidad de mirarlo directamente. Ahora bien, si se rodea dicho número de otros, treses (3) por ejemplo, no será posible identificarlo. Se percibirá desenfocado. En un ensayo, los voluntarios con visión normal no tendrán mayor éxito en el empeño, que el resultante del mero azar. No se debe ello a que los objetos se vean borrosos en la periferia del campo visual. Después de todo, el cinco se veía perfectamente antes de estar rodeado de treses. La razón para no poder identificarlo estriba en una limitación de recursos de la atención: en cierta manera, los treses distraen la atención del cinco central y evitan así su distinción.

Cuando sometimos a dos sinestésicos a este experimento, obtuvimos un resultado sorprendente. Miraban al monitor y declaraban: "No puedo ver el número situado en el medio. Está borroso, pero parece rojo, así que presumo que debe ser un cinco". A pesar de no registrar el número conscientemente, el cerebro lo estaba procesando en algún lugar. Los sinestésicos podían, pues, aprovechar el color para inferir, por deducción mental, de qué número se trataba. Si nuestra teoría es correcta, este descubrimiento revela que el número se procesa en la circunvolución fusiforme y evoca el color correspondiente *antes* del momento en que el efecto "multitud" se manifieste en el cerebro; paradójicamente, hasta un número "invisible" puede producir sinestesia.

Otro ensayo respalda esta conclusión. Procedimos a reducir el contraste entre el número y el fondo: el color se debilitaba hasta que, llegado a un punto de bajo contraste, los sujetos sometidos a ensayo no distinguían color alguno, a pesar de que el número era perfectamente visible. Mientras el experimento "de multitud" demostraba que un número invisible puede evocar un color, el "de contraste" muestra que observar un número no garantiza ver un color. Quizá los números con bajo contraste activan células de la circunvolución fusiforme de una forma suficiente para la percepción consciente del número, pero no suficiente para la activación cruzada de las células del color del área V4.

Descubrimos, por último, que, si mostrábamos a los sinestésicos numerales romanos, un V por ejemplo, no veían ningún color; ello sugiere que no es el *concepto* de número, 5 en este caso, sino su representación gráfica (grafema) lo que provoca la aparición del color. Esta observación nos lleva a presumir una activación cruzada en sinestesia número-color en el interior de la circunvolución fusiforme, ya que esta estructura se halla implicada principalmente en el análisis de la forma visual, no del significado de nivel superior de un número.

Hagamos ahora una prueba curiosa. Imagínese el lector una escena con un gran cinco compuesto de pequeños treses; puede fijar la atención en el "bosque" (los 5) o detenerse minuciosamente en los "árboles" (los treses). Dos individuos con sinestesia declararon percibir un cambio de color, dependiendo de su enfoque. Ello implica que, a pesar de que la sinestesia puede surgir como resultado exclusivo de la apariencia visual —y no del concepto de nivel superior—, importa la forma en que la información visual se jerarquiza en función de la atención.

Pero cuando comenzamos a reclutar otros voluntarios, se tornó evidente que no todas las personas con sinestesia de color son iguales. En algunas, incluso los días de la semana o meses del año evocan colores: el lunes puede ser verde, el miércoles rosa y diciembre amarillo.

Lo único que poseen en común los días de la semana, los meses y los números es el concepto abstracto de secuencia numérica, u ordinalidad. Quizá sea el concepto abstracto de secuencia numérica el detonante de la aparición del color para ciertos sujetos, por encima de la apariencia visual. En estos individuos, la activación cruzada podría transcurrir entre la circunvolución angular y el área superior del color, cercana a la zona TPO, no entre áreas vecinas de la circunvolución fusiforme. Si se confirmase, dicha interacción explicaría por qué incluso la representación abstracta de números, o la *idea* de número provocada por días de la semana o meses, evoca colores específicos. En otras palabras, dependiendo de la zona del cerebro en que se exprese el gen mutante, la sinestesia puede



Los autores

VILAYANUR S. RAMACHANDRAN y EDWARD M. HUBBARD colaboran en sus estudios sobre sinestesia. Ambos trabajan en la Universidad de California en San Diego, cuyo Centro del Cerebro y de la Cognición dirige Ramachandran. Hubbard se halla adscrito al departamento de Psicología y Ciencia Cognitiva.

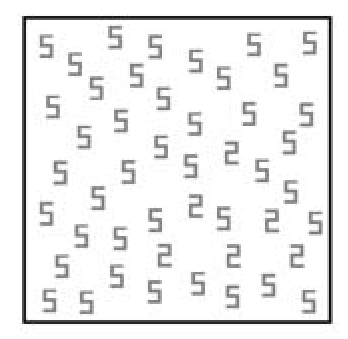
ser de diferente condición: sinestesia "superior", producida por conceptos numéricos, o bien sinestesia "inferior", provocada por la apariencia visual. Análogamente, en alguna de las modalidades "inferiores", la apariencia de una letra puede evocar un color, mientras que en otras "superiores", sería su *sonido* el detonante (los fonemas se procesan en las proximidades de la zona TPO).

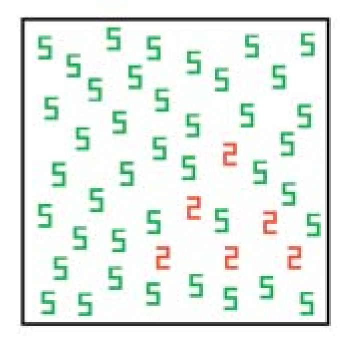
Nos llegamos a encontrar ante el caso de un individuo, cuyos ojos eran insensibles al color, que veía ciertos números teñidos de colores. Los denominaba "colores marcianos". A pesar de que los receptores del color de su retina no podían procesar ciertas longitudes de onda, una explicación plausible del fenómeno observado sugiere que el área del color de su cerebro funcionaba correctamente y se activaba en cruzamiento al ver los números.

En ensayos apoyados en técnicas de formación de imágenes cerebrales que llevamos a cabo en colaboración con Geoff Boynton, del Instituto Salk de Estudios Biológicos de San Diego, hemos recabado pruebas provisionales de la activación local del área del color V4 que respaldan nuestra teoría de la sinestesia por activación cruzada. (Jeffrey Gray y su grupo del Instituto de Psiquiatría de Londres han llegado a similares resultados.) Al presentar números en blanco y negro a sinestésicos, se apreció activación cerebral no sólo en el área numérica —como ocurriría en personas normales—, sino también en el área del color. Observamos, asimismo, diferencias entre tipos distintos de sinestésicos. Uno de los sujetos con sinestesia inferior mostraba mayor activación en los pasos iniciales del procesamiento del color que los sujetos control. Por el contrario, los sujetos con sinestesia superior evidenciaban menor activación en esas fases iniciales.

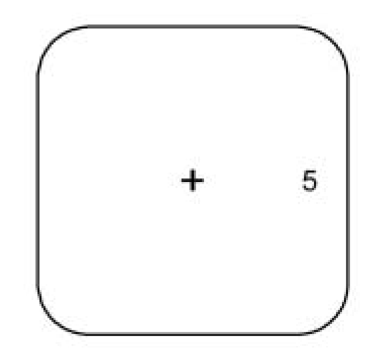
MUNDO CODIFICADO POR COLORES

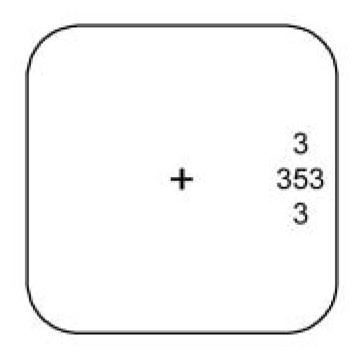
EN UN ENSAYO para analizar la capacidad de segregación visual, las personas con sinestesia, que relacionan un número dado con un color específico, pueden detectar de inmediato un número diferente incrustado entre otros en una ilustración con figuras negras sobre fondo blanco. Mientras que una persona con percepción normal debe emprender una inspección dígito a dígito para distinguir en nuestro ejemplo los doses de los cincos (*izquierda*), el triángulo formado por los doses resalta instantáneamente para un sinestésico (*derecha*).





Un número "invisible" es visible para un sinestésico en un experimento perceptivo: si una persona observa fijamente un objeto central, aquí un signo positivo, un dígito aislado resulta fácil de identificar con visión periférica (*izquierda*). Ahora bien, si el número se halla rodeado de otros (*derecha*), se torna borroso —invisible— para una persona corriente. En cambio, un sujeto con sinestesia puede deducir el número central por el color que le evoca.





VILAYANUR S. RAMACHANDRAN

Una explicación de la metáfora

De nuestra investigación sobre las bases neurológicas podría beneficiarse el estudio en torno a la creatividad de pintores, poetas o novelistas. De acuerdo con un trabajo reciente, la sinestesia en personas creativas septuplica su frecuencia entre la población en general.

Una de las facultades que poseen en común un gran número de personas creativas es la facilidad para la metáfora. ("Es oriente y Julieta es el sol".) Pareciera que sus cerebros estuviesen dotados de la capacidad de establecer conexiones entre conceptos sin relación manifiesta: una joven hermosa y el sol. En otras palabras, así como la sinestesia lleva aparejada la formación de vínculos arbitrarios entre entidades sensoriales independientes, como los números y los colores, la metáfora relaciona dominios conceptuales ajenos entre sí. Y quizás ello no sea mera coincidencia.

Numerosos conceptos de nivel superior se hallan probablemente localizados en regiones cerebrales específicas. No hay nada más abstracto que un número, que, como hemos comprobado, se representa en un área pequeña del cerebro, la circunvolución angular. Supongamos que la mutación causante de la sinestesia trae consigo una comunicación excesiva entre diferentes mapas cerebrales: pequeñas zonas de corteza que representan entidades perceptivas específicas, como la agudeza o curvatura de formas o, en el caso que nos ocupa, tonos de colores. Dependiendo de dónde y cuán extensamente se exprese este rasgo en el cerebro, podría provocar la aparición de sinestesia y cierta propensión a relacionar con-

PREGUNTAS HABITUALES

¿Existen diferentes tipos de sinestesia?
La ciencia estima unos 50. Se trata de una condición de agregación familiar; puede aparecer con mayor frecuencia en personas creativas y en mujeres. Quizás una de cada doscientas personas padezca sinestesia. En el tipo prevalente, el mirar números o el oír determinados sonidos evoca colores. En otra variante poco común, cada letra se asocia al sexo masculino o femenino: un ejemplo de la propensión del cerebro a dividir el mundo en categorías binarias.

Si una persona sinestésica asocia un color con una letra o un número, ¿qué ocurre si ve un par de letras, como "ea", o dígitos dobles, como "25"?
Ve colores que se corresponden con las letras o números individuales. Si las letras o números se encuentran contiguos, es posible que se eliminen mutuamente sus efectos (el color desaparecería) o, si las dos figuras provocan el mismo color, que se realcen.

¿Reviste importancia el hecho de que las letras sean mayúsculas o minúsculas?
En general, no. Pero ciertas personas han declarado ver colores más diluidos en letras minúsculas o que éstas parezcan brillantes o desiguales.

¿Qué apariencia toman las palabras enteras?
A menudo el color de la primera letra se extiende a lo largo de toda la palabra; incluso letras mudas, como la h de "habla", producen dicho efecto.

¿Qué ocurre si el sinestésico es políglota?
Para él, un idioma puede contar con grafemas coloreados, pero otros no, quizá porque las diferentes lenguas se representan en regiones cerebrales distintas.

¿Y si la persona se imagina una letra o un número?
Imaginar una figura puede evocar colores incluso más intensos que verla. Quizá dicho ejercicio active las mismas áreas cerebrales que la visión; ahora bien, al no llegar señales de un número real desde la retina que compitan por la atención, la figura imaginada crea un color sinestésico más intenso.

La sinestesia, ¿mejora la memoria?
Es posible. Aleksandr R. Luria, neurólogo ruso, describió el caso de un individuo cuya memoria notable se debía a la vinculación entre sus cinco sentidos. Tener sólo dos de ellos ligados también podría ayudar.

ceptos sin relación directa, es decir, a la creatividad. Ello explicaría por qué el gen de la sinestesia, aparentemente inútil, ha sobrevivido entre la población.

Nuestra investigación, aparte de esclarecer por qué algunos artistas pudieran ser propensos a padecer sinestesia, sugiere que todos poseemos cierta capacidad para experimentarla. Además, puede ello haber resultado decisivo en la evolución del pensamiento abstracto, habilidad en la que los humanos destacamos. La zona TPO (y la circunvolución angular, incluida en ella), clave para explicar la afección, desempeña también un importante papel en la síntesis de información proveniente de diferentes áreas: se cree que la señal procedente del tacto, el oído y la vista confluyen aquí para habilitar la formación de percepciones de nivel superior. Por ejemplo, un gato es suave (tacto), maúlla y ronronea (oído), posee cierta apariencia (vista) y despide un olor característico (olfato). Todo ello nos viene a la mente cuando nos acordamos de un gato u oímos la palabra "gato".

¿Cabe la posibilidad de que la circunvolución angular —desproporcionadamente mayor en los humanos que en los primates— se hubiese destinado inicialmente a la asociación intermodal, pero después hubiese comenzado a compartir sus recursos con otras funciones más abstractas, como la metáfora? Consideremos dos dibujos, diseñados por el psicólogo Wolfgang Köhler. Uno parece una ameba y el otro, un trozo de cristal roto. Al proponer la siguiente pregunta: "¿Cuál es 'buba' y cuál es 'kiki'?", el 98 % de las personas escogieron la ameba como buba y al cristal como kiki. Quizá se deba a que las suaves curvas de la primera remedan metafóricamente la ondulación sutil del sonido "buba" (según se representa en los centros auditivos cerebrales), así como la inflexión gradual de los labios al emitir dicho sonido. Por el contrario, el agudo sonido de "kiki", así como la brusca inflexión de la lengua hacia el paladar al emitirlo, reproducen en cierto modo los bruscos cambios de forma de la segunda figura. Esta asociación proviene de una zona vecina de la TPO, probablemente de la circunvolución angular. En cierto sentido, quizá todos somos sinestésicos ocultos. (Hemos comprobado que las personas con la circunvolución angular dañada no responden al "efecto buba-kiki", es decir, no relacionan la figura con el sonido según el patrón habitual.)

La circunvolución angular realiza, por tanto, un tipo elemental de abstracción: extrae el denominador común de un conjunto de entidades disímiles. Desconocemos cómo se lleva a cabo esta tarea, pero pudiera haber ocurrido que, en el curso de la evolución, una vez se puso la primera piedra con la abstracción intermodal se allanase el camino para tipos más complejos de abstracción. La utilización de una fun-

La sinestesia podría proporcionar ciertas claves sobre la evolución del pensamiento y el lenguaje

Situémonos millones de años atrás, con un grupo de homínidos a punto de inventar un lenguaje. No comenzarían con un líder diciendo: "Mirad esto: llamémoslo plátano. Repetid conmigo: pla-ta-no". Indudablemente, el grupo hubo de poseer un conjunto de capacidades que constituyese la base para la comunicación oral sistemática. Nuestros estudios sobre la base neurobiológica de la sinestesia sugieren que la facilidad para componer metáforas —para establecer conexiones profundas entre objetos superficialmente diferentes e independientes entre sí— constituyó la primera semilla para la aparición del lenguaje.

Los humanos tenemos una predisposición innata a asociar sonidos con formas visuales. Esa cualidad pudo haber revestido una importancia decisiva para el despegue de un vocabulario común en los homínidos. Además, las áreas cerebrales que procesan la apariencia visual de los objetos, letras y números y las que tratan los sonidos de las palabras, se pueden activar unas a otras, incluso en personas no sinestésicas. Ello justificaría, por ejemplo, que las personas esperen que a los objetos puntiagudos se les asignen nombres de fonética áspera.

Otros dos tipos de conexiones neuronales apoyan esta tesis. En primer lugar, las áreas sensoriales que procesan las formas visuales y los sonidos en la parte posterior del cerebro pueden activar de manera cruzada las áreas motoras de la parte anterior

del cerebro que intervienen en la articulación del lenguaje. Una apariencia puntiaguda o un sonido áspero inducirían, pues, a la zona motora a producir una inflexión rápida de la lengua sobre el paladar. (Reparemos, por ejemplo, en las palabras coloquiales "diminuto", "mínimo": van acompañadas de un movimiento de labios que imitan el pequeño tamaño del objeto al que se califica.) El cerebro parece seguir reglas preexistentes para traducir lo que vemos y oímos en movimientos bucales que reflejen dichas informaciones.

En segundo lugar, hay una especie de desbordamiento de las señales de dos áreas motoras contiguas: las que controlan la secuencia de movimientos de los músculos de las manos y las de la boca. Denominamos dicho efecto "sinquinesia" Como apuntó Charles Darwin, cuando cortamos papel con unas tijeras, nuestra mandíbula puede abrirse y cerrarse al compás de nuestros movimientos. Muchos lingüistas no consideran válida la idea de que la gesticulación manual pudo haber constituido la base del lenguaje oral, pero nosotros creemos que el fenómeno de la "sinquinesia" sugiere que pueden estar equivocados.

Damos por supuesto que nuestros antepasados homínidos se comunicaran mediante gruñidos, alaridos y chillidos emocionales; se originan, como se sabe, en el hemisferio derecho y en una zona del lóbulo frontal implicada en las emociones. Más tarde, los homínidos desarrollaron un sistema gestual rudimentario que fue ganando en refinamiento y complicación. No cuesta imaginar que el movimiento de las manos consistente en agarrar a otro hacia uno mismo evolucionó en el sentido de un comportamiento de atracción más suave. Si tales gestos se tradujeron, a través de la sinquinesia, en movimientos de la boca y del rostro, y si las emisiones guturales se canalizaron a través de los movimientos de la boca y de la lengua, el resultado pudo haber sido el primer lenguaje hablado.

¿Cómo podemos incorporar la sintaxis, las reglas a seguir para ordenar palabras y frases, a este esquema? Opinamos que la evolución de las herramientas empleadas por los homínidos pudo haber desempeñado un importante papel. Por ejemplo, la secuencia de construcción de un útil —primero dar forma a la cabeza del martillo, después fijarlo a un mango y por último despedazar la comida— se asemeja a la disposición de oraciones en frases largas. Secundando la teoría postulada por Patricia Greenfield, psicóloga de la Universidad de California en Los Angeles, proponemos que las áreas cerebrales frontales que evolucionaron en principio para la construcción de herramientas pudieron ser empleadas a posteriori para una función inédita: conjuntar palabras en oraciones.




A LA PREGUNTA de cuál de las dos figuras representadas es "buba" y cuál es "kiki", el 98 por ciento de los encuestados escogieron la de la izquierda como buba y la otra como kiki. Los autores sostienen que la habilidad del cerebro de escoger una característica abstracta común —como una forma puntiaguda y un sonido áspero— podría haber allanado el camino para la aparición de la metáfora y quizás incluso de un vocabulario compartido.

VILAYANUR S. RAMACHANDRAN

ción para fines diferentes de los previstos en su origen constituye un fenómeno común en la historia de la evolución. Por ejemplo, los huesos del oído de los mamíferos evolucionaron a partir de la porción posterior de la mandíbula de los reptiles. Más allá de la metáfora y del pensamiento abstracto, la abstracción intermodal podría incluso haber plantado la semilla para la aparición del lenguaje.

En el momento de comenzar nuestra investigación sobre la sinestesia no barruntábamos, ni de lejos, dónde llegaríamos. Apenas sospechábamos que este misterioso fenómeno, reputado durante decenios mera curiosidad, podría arrojar un rayo de luz sobre la naturaleza del pensamiento.

Bibliografía complementaria

THE MAN WHO TASTED SHAPES. R. E. Cytowic. MIT Press, 1993.

SYNAESTHESIA: CLASSIC AND CONTEMPORARY READINGS. S. Baron-Cohen y J. E. Harrison. Blackwell, 1997.

PSYCHOPHYSICAL INVESTIGATIONS INTO THE NEURAL BASIS OF SYNAESTHESIA. V. S. Ramachandran y E. M. Hubbard, en *Proceedings of the Royal Society of London*, B. vol. 268, págs. 979-983; 2001.

SYNAESTHESIA: A WINDOW INTO PERCEPTION, THOUGHT AND LANGUAGE. V. S. Ramachandran y E. M. Hubbard, en *Journal of Consciousness Studies*, volumen 8, n.º 12, págs. 3-34; 2001.

SYNAESTHETIC PHOTISMS INFLUENCE VISUAL PERCEPTION. D. Smilek, M. J. Dixon, C. Cudahy y M. Merikle, en *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 13, n.º 7, págs. 930-936; 2001.

FUNCTIONAL MAGNETIC RESONANCE IMAGING OF SYNESTHESIA: ACTIVATION OF V4/V8 BY SPOKEN WORDS. J. A. Nunn, L. J. Gregory, M. Brammer, S. C. R. Williams, D. M. Parslow, M. J. Morgan, R. G. Morris, E. T. Bullmore, S. Baron-Cohen y J. A. Gray, en *Nature Neuroscience*, volumen 5, páginas 371-375; 2002.

Ordenadores, paradojas y fundamentos de las matemáticas

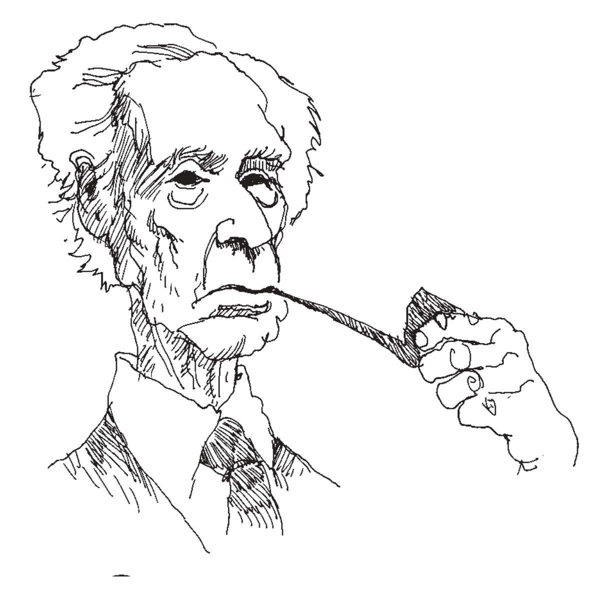
Grandes pensadores del siglo XX han demostrado que la incompletitud y la aleatoriedad medran incluso en el mundo austero de la matemática

Gregory J. Chaitin

Todos saben que los ordenadores son aparatos muy prácticos. Tanto, que se han vuelto indispensables en el funcionamiento de una sociedad moderna. Pero hasta los informáticos han olvidado —exagero, pero sólo un poco— que fueron inventados para que ayudasen a aclarar una cuestión filosófica concerniente a los fundamentos de la matemática. ¿Sorprendente? Sí, en verdad.

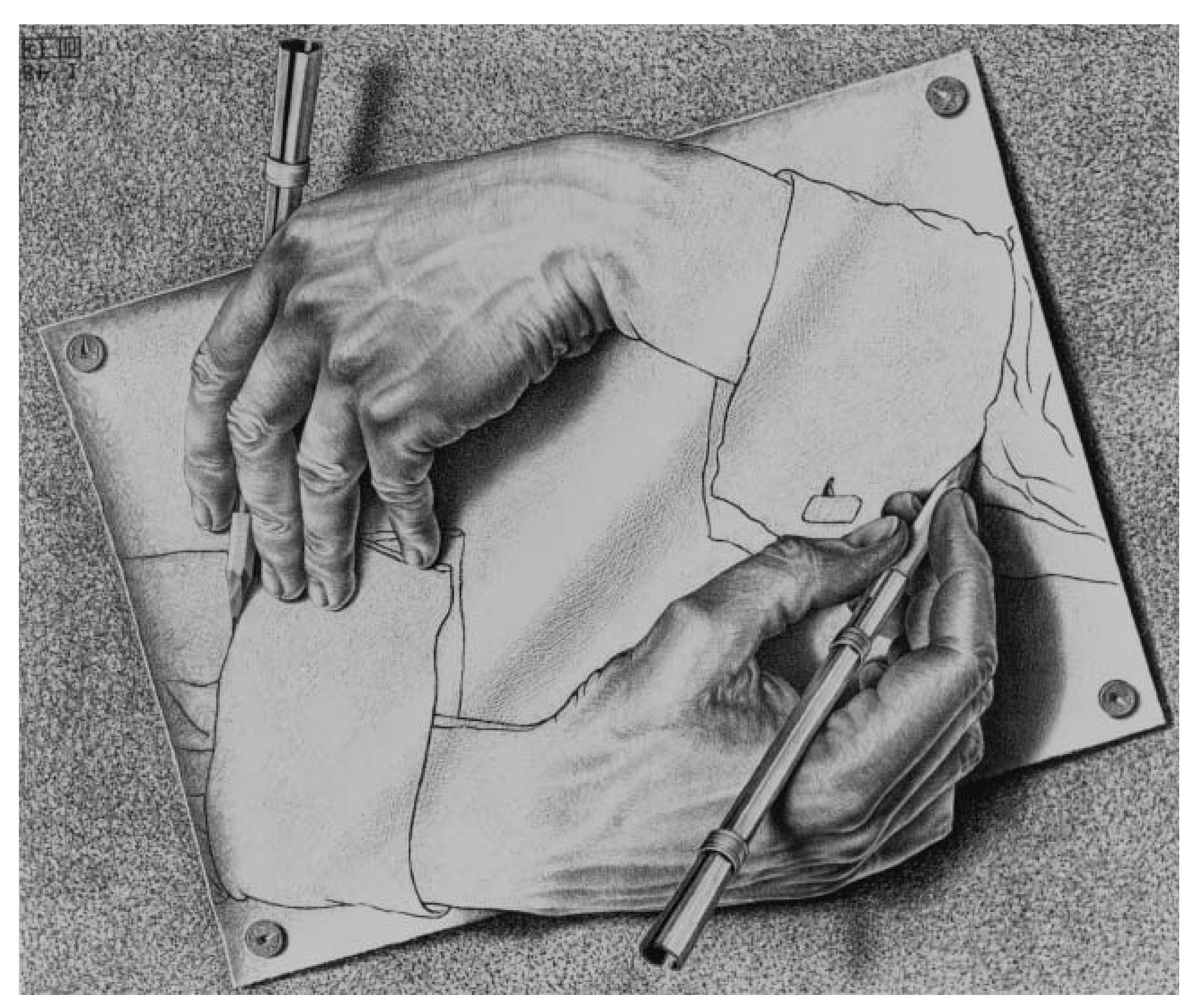
Comienza esta asombrosa historia con David Hilbert, un célebre matemático alemán, que a principios del siglo XX propuso la formalización completa de todo el razonamiento matemático. Pero resultó que era imposible formalizar el razonamiento matemático, por lo que, en cierto sentido, su idea fue un tremendo fracaso. Mas, en otro sentido, tuvo un gran éxito, porque el formalismo ha sido uno de los grandes dones que nos ha hecho el siglo XX. No para el razonamiento o la deducción matemática, sino para la programación, para el cálculo, para la computación. Una pieza olvidada de la historia intelectual.

Me propongo referir aquí esa historia sin detenerme en los detalles de índole matemática. Será, pues, imposible explicar plenamente la obra de quienes hicieron las aportaciones fundamentales, entre ellos Bertrand Russell, Kurt Gödel y Alan Turing. Aun así, el lector paciente debería poder captar la esencia de sus argumentos y comprender en qué se inspiraron algunas de mis propias ideas sobre la aleatoriedad inherente a la matemática.



Las paradojas lógicas de Russell

Voy a empezar con Bertrand Russell, matemático que al pasar el tiempo se tornaría filósofo, primero, y por último, humanista. Russell constituye una figura clave porque descubrió algunas paradojas muy perturbadoras en la lógica misma. Es decir, halló casos en los que razonamientos en apariencia impecables conducen a contradicciones. Las aportaciones de Russell fueron fundamentales para que se difundiese la idea de que estas contradicciones causaban



1. *MANOS QUE DIBUJAN,* **obra creada por M. C. Escher en 1948, proporciona una analogía visual de la "paradoja de Russell", así llamada en recuerdo del matemático británico Bertrand Russell. Planteó a sus coetáneos de principios del siglo XX este problema lógico, que más tarde inspiraría los trabajos de Kurt Gödel, de Alan Turing y del autor sobre los límites de las matemáticas. Una de las formas que toma la paradoja de Russell es el par de enunciados: "La oración siguiente es falsa. La oración anterior es verdadera." Cada aserto, por separado, parece razonable (es decir, puede ser verdadero o falso); en cambio no es posible evaluar su verdad o falsedad al tomarlos conjuntamente. Es su combinación la que origina la paradoja, lo mismo que las dos manos del dibujo de Escher.**

una crisis grave y habían de ser resueltas de algún modo.

Las paradojas que Russell descubrió atrajeron mucho la atención en los círculos matemáticos, pero, curiosamente, tan sólo una de ellas acabó llevando su nombre. Consideremos el conjunto de todos los conjuntos que no son un elemento de sí mismos. Preguntemos entonces: "¿Es este conjunto elemento de sí mismo?". Si fuera elemento de sí mismo, no lo sería, y recíprocamente.

El conjunto de todos los conjuntos mencionados en la paradoja de Russell encuentra un símil en el barbero de un pueblo pequeño y apartado: el barbero rasura a todos los hombres que no se afeitan ellos mismos. Tal descripción parece francamente razonable hasta que se pregunta: "¿Se afeita el barbero a sí mismo?". Se afeita a sí mismo si, y solamente si, no se afeita a sí mismo. Desde luego, se podría decir: "¿Y a quién le importa ese hipotético barbero? ¡Todo eso no es más que un absurdo juego de palabras!". Pero cuando lo que se está dilucidando es el concepto matemático de conjunto, no resulta tan fácil dejar de lado un problema lógico.

La paradoja de Russell es un eco, en la teoría de conjuntos, de otra paradoja muy anterior, ya conocida por los antiguos griegos. A menudo se la llama paradoja de Epiménides, o paradoja del mentiroso. Se dice que Epiménides exclamó: "¡Esta aseveración es falsa!". ¿Lo es? Si su aseveración es falsa, ha de ser verdadera. Pero, si es verdadera, es falsa. Así que, cual-

quiera que sea la hipótesis sobre su veracidad, estamos en conflicto. Otra versión de la paradoja, en dos enunciados, reza: "El enunciado siguiente es verdadero. El enunciado precedente es falso". Cada enunciado, individualmente, parece estar claro, pero, combinados, crean un sinsentido. Es posible desdeñar tales paradojas, considerándolas juegos de palabras sin significado, pero algunas de las más grandes inteligencias del siglo XX se las tomaron muy en serio.

Una de las reacciones a la crisis de la lógica fue la tentativa de Hilbert, que trató de eludirla por medio del formalismo. Si encontramos conflictos al seguir razonamientos que parecen correctos, la solución consiste en utilizar la lógica simbólica para crear un lenguaje artificial y ser muy cuidadosos al especificar sus reglas, de modo que no surjan contradicciones. Después de todo, el lenguaje cotidiano es ambiguo: no siempre se sabe de cierto cuál es el antecedente de un pronombre.

El plan de rescate de Hilbert

La idea de Hilbert consistía en crear para el razonamiento, para la deducción y para la matemática un lenguaje artificial perfecto. Hizo, por tanto, hincapié en la importancia del método axiomático, donde se parte de un conjunto de postulados básicos (axiomas) y reglas bien definidas para efectuar deducciones y derivar teoremas válidos. La idea de trabajar matemáticamente de este modo se remonta a los antiguos griegos, y en particular, a Euclides y su geometría, un sistema de hermosa claridad matemática.

Dicho de otro modo, era intención de Hilbert ser absolutamente riguroso en lo que se refería a las reglas del juego —las definiciones, los conceptos elementales, la gramática y el lenguaje—, de modo que hubiera un general acuerdo sobre la forma en que se había de hacer la matemática. En la práctica resultaría excesivamente laborioso utilizar un sistema axiomático tal para desarrollar nuevos resultados o teorías matemáticas, pero su importancia desde el punto de vista filosófico sería grande.



La propuesta de Hilbert no parecía demasiado espinosa. Después de todo, no hacía sino seguir las tradiciones de formalización de la matemática; bebía de una larga historia de trabajos de Leibniz, Boole, Frege, y Peano. Pero lo que él deseaba era recorrer el camino completo, hasta el mismísimo fin, y formalizar la *totalidad* de la matemática. La gran sorpresa fue que tal cosa no resultase posible. Hilbert estaba equivocado, aunque su error fue tremendamente fructífero porque había planteado una pregunta muy acertada. Al formularla creó una disciplina del todo nueva, la *metamatemática*, un campo introspectivo de la matemática en el que se estudia lo que la matemática puede, o no puede, conseguir.

La noción fundamental es la siguiente: en cuanto se entierra la matemática en un lenguaje artificial *à la* Hilbert, en cuanto se establece un sistema axiomático completamente formal, podemos olvidarnos de que posee algún significado y limitarnos a considerarla un juego; sus piezas serían marcas trazadas en un papel, y consistiría en deducir teoremas de los axiomas. Claro está, si se hace matemática es porque tiene significado. Pero si se desea estudiar la matemática utilizando métodos matemáticos, es necesario destilar el significado y limitarnos a examinar un lenguaje artificial con reglas absolutamente precisas.

¿Qué clase de cuestiones podríamos plantear? Por ejemplo, si se puede demostrar que 0 = 1. (Podemos esperar que no.) A decir verdad, dada una proposición cualquiera, llamémosla A, podemos preguntarnos si es posible demostrar, o bien A, o bien la contraria de A. Se considera que un sistema axiomático formal es completo si se puede demostrar, bien que A es verdadera, bien que A es falsa.

Hilbert perseguía la creación de reglas tan precisas, que toda demostración pudiera siempre someterse a un arbitraje imparcial, a un procedimiento mecánico capaz de afirmar "esta demostración se atiene a las re-

El autor

GREGORY J. CHAITIN es matemático del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, en Yorktown Heights, Nueva York. Es también profesor visitante en las universidades de Buenos Aires y de Auckland. Ha sido, a lo largo de los últimos 35 años, el principal arquitecto de la teoría algorítimica de la información, que inventó cuando todavía no contaba 20 años. Su logro más reciente ha consistido en transformar la teoría algorítmica de la información de modo que sea aplicable a los programas informáticos reales. El presente artículo es resumen de una conferencia pronunciada en 1999 en la Universidad de Massachusetts en Lowell, cuya versión completa está publicada en el libro *Conversations with a Mathematician*. Se reproduce con permiso de Springer-Verlag.



glas", o tal vez "hay un error tipográfico en la línea 4", o "eso que en la línea 4 se supone es consecuencia de la línea 3, en realidad no lo es". Ese veredicto sería el final. Sin apelación.

No pensaba Hilbert que la creación matemática hubiera de llevarse a cabo de ese modo, sino que, si se pudiera hacer matemática de ese modo, se podría utilizarla para estudiar su propio poder. Y Hilbert pensó que él mismo iba a ser capaz de ejecutar tal empresa. Podemos, pues, imaginar la enormidad del desconcierto cuando en 1931 un matemático austríaco, Kurt Gödel, demostró que el plan de rescate de Hilbert no era en modo alguno razonable. Jamás podría ser llevado a efecto, ni siquiera en principio.

La incompletitud de Gödel

Gödel dinamitó la visión de Hilbert en 1931. Por entonces era docente en la Universidad de Viena, si bien procedía de la hoy llamada República Checa, de la ciudad de Brno en concreto, que en aquella época formaba parte del Imperio Austrohúngaro. Posteriormente, pasaría, como Einstein, al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

El descubrimiento de Gödel fue pasmoso: Hilbert estaba totalmente equivocado; no hay modo de que exista un sistema axiomático para la totalidad de la matemática en el que quede claro como el agua si un enunciado es verdadero o no. Con mayor precisión: Gödel descubrió que el plan falla aun limitándose a la aritmética elemental, es decir, a los números 0, 1, 2, 3... la adición y la multiplicación.

Cualquier sistema formal que trate de contener toda la verdad y nada más que la verdad al respecto de la adición, la multiplicación y los números 0, 1, 2, 3,... tendrá que ser incompleto. O más bien: será, ora incoherente, ora incompleto. Por tanto, si se supone que solamente dice la verdad, entonces no dirá toda la verdad. En particular, si se supone que los axiomas y las reglas de deducción no permiten la demostración de teoremas falsos, habrá teoremas verdaderos que no podrán ser demostrados.

La demostración de la incompletitud dada por Gödel es muy ingeniosa. Muy paradójica. Una locura casi. Gödel empieza, en efecto, con la paradoja del mentiroso, a saber, la afirmación "¡soy falsa!", que no es ni verdadera ni falsa. En realidad, lo que Gödel hace es construir una aseveración que dice de sí misma: "¡Soy indemostrable!". Desde luego, hará falta muchísimo ingenio para poder construir en la teoría elemental de números —en la aritmética— un enunciado matemático que se describa a sí mismo y diga semejante cosa, pero *si fuéramos capaces* de lograrlo, enseguida comprenderíamos que estaríamos en un brete. ¿Por qué? Porque si el enunciado es demostrable, entonces es necesariamente falso; estaríamos demostrando resultados falsos. Si es indemostrable, como dice de sí mismo, entonces es verdadero, y la matemática, incompleta.

Hay en la demostración de Gödel muchos detalles técnicos complicados. Pero al consultar su artículo original, encontramos en él algo que se parece mucho a la programación en LISP. Es debido a que la demostración de Gödel comporta la definición recursiva de una gran cantidad de funciones que operan sobre listas, y eso es precisamente lo que hace LISP. Así pues, aunque en 1931 no existían los ordenadores ni los lenguajes de programación, una mirada retrospectiva deja ver claramente un lenguaje de programación en el núcleo del artículo original de Gödel.

John von Neumann, otro famoso matemático de aquellos tiempos (que, dicho sea de paso, tuvo un importante papel en la promoción y la creación de la tecnología informática en los Estados Unidos), apreció inmediatamente el hallazgo de Gödel. Von Neumann jamás se había planteado que el proyecto de Hilbert pudiera ser erróneo. Así pues, Gödel no sólo había demostrado una inteligencia apabullante, sino que tuvo la valentía de presumir que Hilbert podría estar equivocado.

Muchos consideraron que el artículo de Gödel era absolutamente devastador. Toda la filosofía matemática tradicional acababa de quedar reducida a escombros. En 1931, sin embargo, había en Europa algunos otros problemas de los que preocuparse: una gran depresión económica y una guerra en ciernes.

La máquina de Turing

El siguiente avance de importancia tuvo lugar cinco años después, en Inglaterra, cuando Alan Turing descubrió la no-computabilidad. Recordemos que, según Hilbert, debía existir "un procedimiento mecánico" que decidiese si una demostración se atenía a las reglas o no. Hilbert no aclaró nunca qué entendía por procedimiento mecánico. Turing, en esencia, vino a decir que se trataba de una máquina (una máquina de un tipo que ahora llamamos máquina de Turing).

El artículo original de Turing contiene un lenguaje de programación, lo mismo que el artículo de Gödel,



o mejor dicho, lo que hoy denominaríamos un lenguaje de programación. Pero esos dos lenguajes de programación son muy diferentes. El de Turing no es un lenguaje de alto nivel, como el LISP; se trata más bien de lenguaje de máquina, el código "en crudo" formado por unos y ceros que se le suministra al procesador central de un ordenador. El invento de Turing de 1936 es, de hecho, un lenguaje de máquina horrible, que nadie querría utilizar hoy, porque es demasiado rudimentario.

Pero aunque las máquinas computadoras hipotéticas de Turing sean muy sencillas, y su lenguaje de máquina bastante primitivo, no carecen precisamente de versatilidad. En su artículo de 1936, Turing afirma que una máquina tal debería ser capaz de efectuar cualquier cómputo que un ser humano pudiese llevar a cabo.

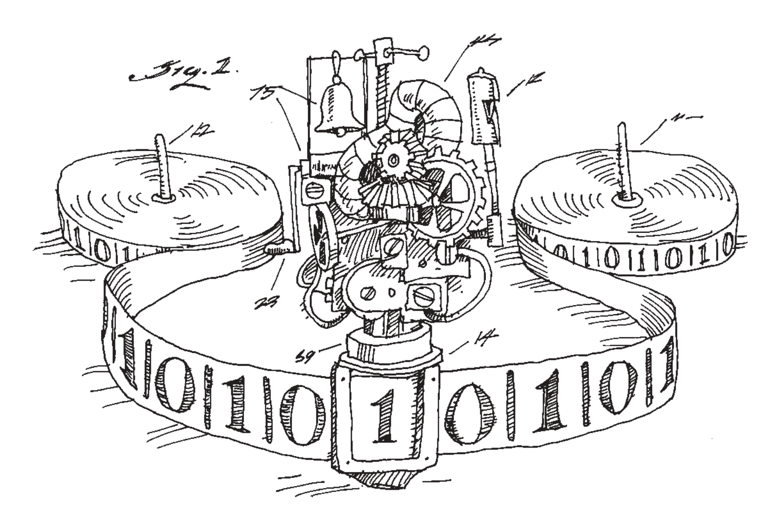
En este punto, el curso del razonamiento de Turing experimenta un violento giro. ¿Qué le sería *imposible* a semejante máquina? ¿Qué es lo que no podría hacer? Y Turing encuentra inmediatamente un problema que ninguna máquina de las que llevan su nombre podría resolver: el problema de la detención, es decir, decidir de antemano si una máquina de Turing (o un programa de ordenador) acabará por hallar su solución deseada y, por tanto, se detendrá.

Si se impone un límite de tiempo, este problema tiene muy fácil solución. Supongamos que deseamos saber si un programa dado llegará a detenerse en el plazo de un año. En tal caso, basta hacerlo funcionar durante un año y observar si se detiene o no. Lo que Turing hizo ver es que podemos encontrarnos en una dificultad muy seria si no se impone límite de tiempo, si tratamos de deducir si un programa se detendrá o no sin limitarnos meramente a hacerlo funcionar.

Trataré de esbozar el razonamiento de Turing. Supongamos posible la creación de un programa de ordenador capaz de averiguar si un programa, cualquiera que sea, llegará a detenerse. Llamémoslo, por comodidad, un "verificador de terminación". En teoría, le suministraríamos un programa y emitiría una respuesta: "sí, este programa terminará," o bien, "no, este programa seguirá haciendo girar sus ruedas en un bucle infinito y nunca llegará a detenerse". Preparemos ahora un segundo programa basado en el verificador de terminación. Consistirá en modificar el verificador de modo que, cuando se le entregue para examen un programa que termine, entre en un bucle infinito. Y aquí viene la parte sutil: suministre a su nuevo programa una copia de sí mismo. ¿Qué hará?

No olvide que ha preparado el nuevo programa de verificación de manera que entre en un bucle infinito si el programa sometido a prueba termina. Pero ahora el programa objeto de verificación es el propio programa verificador modificado. Por consiguiente, si terminase, habría de entrar en un bucle infinito, lo que significa que no termina: una contradicción. Tampoco sirve de nada suponer lo contrario. Si el programa no terminase, el verificador de terminación indicaría tal hecho, y el programa no entraría en bucle infinito, llegando, pues, a término. Esta paradoja llevó a Turing a considerar que sería imposible idear un verificador de terminación universal.

Lo más interesante es que Turing dedujo un corolario inmediato: Si no hay forma de determinar de antemano mediante cálculos si un programa va a dete-



2. EL ARTICULO DE ALAN TURING de 1936 introdujo la noción de "máquina capaz de realizar, casilla a casilla, operaciones sobre una cinta infinitamente larga". Esta construcción mental recibe desde entonces el nombre de "máquina de Turing". Este artilugio imaginario puede leer lo que está escrito en una casilla de la cinta. En función del estado interno de la máquina, deja tal cual o modifica esa casilla, desplaza la cinta un espacio hacia la izquierda o hacia la derecha, y repite el proceso. Turing demostró que un autómata así podría servirse de este sencillo procedimiento para llevar a cabo cualquier cálculo concebible, con tal de que se le proporcionara el conjunto adecuado de instrucciones básicas.

nerse o no, tampoco puede haber ningún modo de averiguarlo mediante razonamientos. Ningún sistema axiomático formal puede facultarnos para decidir si un programa acabará por detenerse. ¿Por qué? Porque si fuera posible utilizar a tal fin un sistema axiomático, éste nos proporcionaría los medios para calcular por adelantado si un programa se detendrá o no. Lo cual es imposible, pues se obtendría una paradoja del estilo de "¡esta aseveración es falsa!". Se puede crear un programa que se detiene si y solamente si no se detiene. La paradoja es similar a la descubierta por Gödel en sus investigaciones sobre la teoría de números. (Recordemos que no había dificultades mayores en el sistema que Gödel examinó que las que 0, 1, 2, 3..., la adición y la multiplicación ofrecen.) La proeza de Turing consistió en demostrar que *ningún* sistema axiomático formal puede ser completo.

Al desencadenarse la Segunda Guerra Mundial, Turing comenzó a trabajar en criptografía y von Neumann en el cálculo de detonaciones de bombas atómicas. El mundo dejó de lado durante un tiempo el problema de la incompletitud de los sistemas axiomáticos.

La aleatoriedad en la matemática

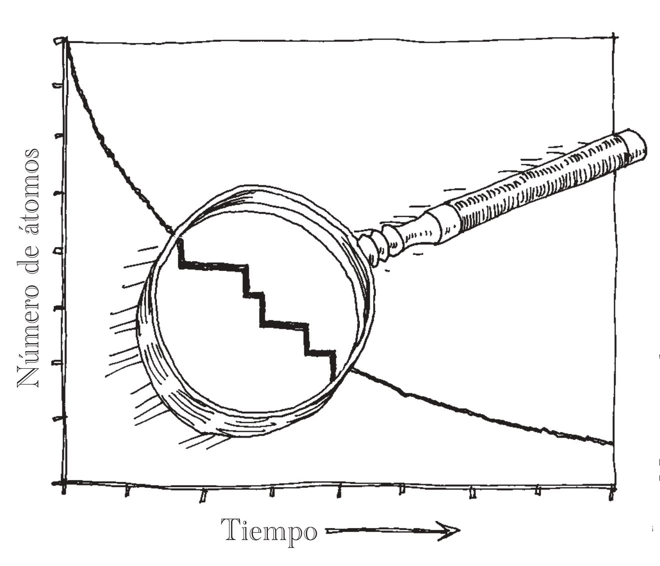
La generación de matemáticos preocupados por estas profundas cuestiones filosóficas quedó prácticamente extinta con la Segunda Guerra Mundial. Luego vine yo.

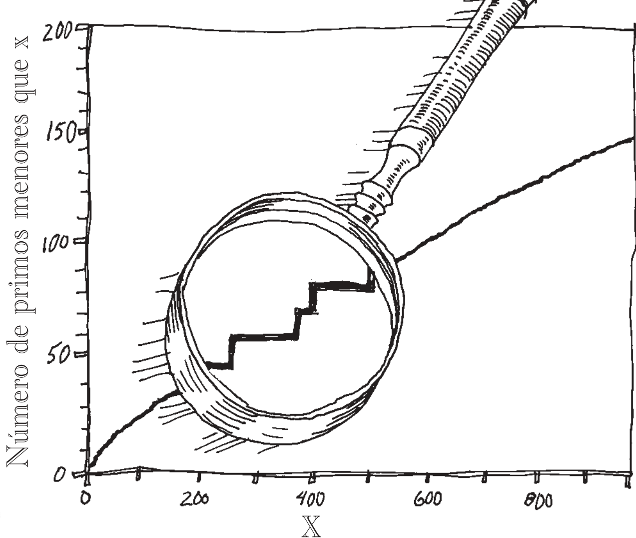
A finales de los años cincuenta, yo era casi un niño, leí en *Scientific American* un artículo sobre Gödel y la incompletitud. El resultado de Gödel me dejó fascinado, aunque en realidad no pude comprenderlo del todo; me pareció que había en él algo de dudoso. En cuanto al método de Turing, consideré que profundizaba mucho más, pero todavía no me sentía satisfecho. Fue por entonces cuando se me ocurrió una curiosa idea sobre la aleatoriedad.

De muchacho también leía mucho acerca de otra famosa cuestión intelectual, no la de los fundamentos de la matemática, sino la de los fundamentos de la física —sobre la teoría de la relatividad y la cosmología, e incluso más frecuentemente sobre la mecánica cuántica—. Aprendí que cuando las cosas son muy pequeñas, el mundo físico se comporta de una forma descabellada; en realidad, es aleatorio; es intrínsecamente impredictible. Estaba yo leyendo acerca de todo esto, y empecé a considerar si no habría también aleatoriedad en la matemática pura. Empecé a sospechar que ésa pudiera ser la verdadera causa de la incompletitud.

Hay un ejemplo que viene al caso en la teoría elemental de números, donde se plantean ciertas cuestiones muy difíciles. Tomemos los números primos. Si estamos interesados en su estructura de detalle, resulta que los números primos se comportan de forma muy impredictible. Es cierto que existen en ellos regularidades estadísticas. Se tiene, sea por caso, el llamado teorema de los números primos, que pronostica con muy buena precisión la distribución media de los números primos. Pero en lo que toca a la distribución detallada de cada número primo, parece a las claras aleatoria.

Empecé, pues, a pensar que pudiera ser que la aleatoriedad inherente a la matemática proporcionase una razón más profunda de toda esta incompletitud. A mediados de los años sesenta, A. N. Kolmogoroff, en la Unión Soviética, y yo, cada por su lado, aportamos nuevas ideas, a las que me gusta llamar "teoría al-





3. LA MECANICA CUANTICA refleja el papel de la aleatoriedad en la física. La desintegración de una sustancia radiactiva, en apariencia progresiva y regular, está compuesta en realidad por una serie de pasos discretos, siendo imposible predecir el momento exacto en que se desintegrará el átomo siguiente (*a la izquierda*). El trabajo del autor pone de relieve una aleatoriedad similar en la matemática, observable, por ejemplo, en la distribución de los números primos. Aunque el número de primos menores o iguales que *x* sigue una tendencia bien conocida, la curva está formada por una serie de pasos erráticos, no siendo posible predecir el valor exacto del número primo siguiente a partir de ninguna teoría general (*a la derecha*).



4. LAS INVESTIGACIONES DE KURT GÖDEL condujeron a la concepción moderna de la aleatoriedad como propiedad tan inherente a la matemática como a la física. Albert Einstein se resistía a aceptarlo. A pesar de ello, los dos fueron íntimos amigos en sus días de Princeton.

CORTESÍA DE LOS ARCHIVOS DEL INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS DE PRINCETON

gorítmica de la información". Aunque el nombre parezca rimbombante, la idea fundamental es muy sencilla: se trata, simplemente, de medir la complejidad computacional.

Encontré una de las primeras referencias a la complejidad algorítmica de que yo tuviese noticia en un trabajo de von Neumann. Turing consideraba a la computadora como mero concepto matemático —una computadora perfecta, que jamás comete errores, que dispone de tanto espacio y tiempo como necesite—. Después de que Turing diese a conocer esta idea, el paso lógico siguiente para un matemático consistía en calcular el tiempo necesario para efectuar un cálculo; sería una medida de la complejidad de éste. Hacia 1950, von Neumann hizo resaltar la importancia de la complejidad temporal de los cálculos; hoy es una especialidad bien desarrollada.

Mi idea no era estudiar el tiempo, a pesar de que, desde un punto de vista práctico, sea muy importante, sino el *tamaño* de los programas informáticos, la cantidad de información que es necesario proporcionar a un ordenador para que realice una determinada tarea. ¿Por qué es interesante? Porque la noción de complejidad asociada al tamaño del programa se liga con la noción de entropía de la física.

Recordemos que la entropía desempeñó un papel crucial en los trabajos de un famoso físico del siglo XIX, Ludwig Boltzmann, y ocupa un lugar central en la mecánica estadística y en la termodinámica. La entropía mide el grado de desorden, caos, aleatoriedad de un sistema físico. La entropía de un cristal es pequeña; en un gas a temperatura ambiente, alta.

La entropía guarda relación con una cuestión filosófica de la mayor importancia, a saber: ¿por qué corre el tiempo en un solo sentido? En la vida ordinaria existe, desde luego, una gran diferencia entre la retrogradación y la progresión en el tiempo. Un vaso se rompe, pero no se recompone espontáneamente. De igual modo, en la teoría de Boltzmann la entropía tiene necesariamente que aumentar: el sistema ha de adquirir cada vez mayor desorden. Tal principio se denomina Segundo Principio de la Termodinámica.

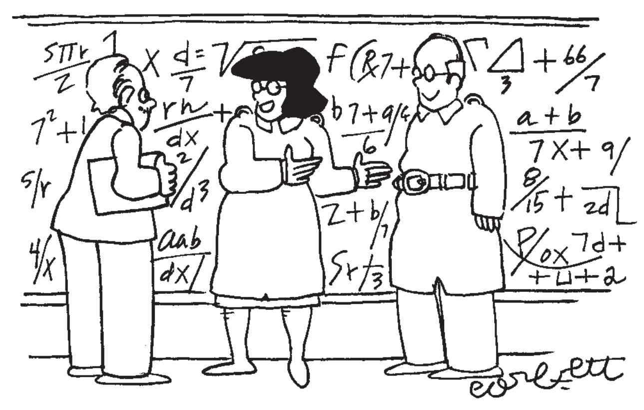
Los contemporáneos de Boltzmann no conseguían ver la forma de deducir este resultado a partir de la física newtoniana. Después de todo, en un gas, donde los átomos chocan y rebotan como si fueran bolas de billar, cada interacción es reversible. Si tuviéramos algún modo de filmar una pequeña porción de gas durante un breve tiempo, no podríamos saber, al ver la película, si estaba siendo pasada hacia delante o hacia atrás. Pero la teoría de los gases de Boltzmann afirma que existe una flecha del tiempo, que un sistema partirá de un estado ordenado y acabará en un estado muy desordenado y mezclado. Existe incluso un nombre amedrentador para la situación final: la "muerte térmica".

La relación entre mis ideas y la teoría de Boltzmann se debe a que el tamaño de un programa de ordenador es análogo al grado de desorden de un sistema físico. El programa necesario para especificar dónde se encuentran todos los átomos de un gas tendría que ser enorme; en cambio, para la descripción de un cristal no haría falta un programa tan grande, a causa de la regularidad de su estructura. La entropía y el tamaño de programa se encuentran, pues, íntimamente relacionados.

La noción de complejidad medida por el tamaño de programa guarda relación también con la filosofía del método científico. Ray Solomonoff (un científico informático que entonces trabajaba en Zator Company, en Cambridge, Massachusetts) propuso esa idea en 1960, en un congreso profesional; yo no tuve noticia de su trabajo hasta después de haber llegado por mí mismo, varios años después, a ideas muy parecidas. Basta pensar en el principio de "la navaja de Occam": la teoría más sencilla es la mejor. Ahora bien, ¿qué es una teoría? Es un programa de ordenador para la predicción de observaciones. Y el aserto de que la mejor teoría es la más sencilla se traduce en la afirmación de que un programa informático conciso constituye la teoría óptima.

¿Y si no existe una teoría concisa? ¿Y si el programa más breve capaz de reproducir un conjunto de datos experimentales es del mismo tamaño que el conjunto de datos? En este caso, la teoría no sirve de nada —es un amaño—; los datos resultarían incomprensibles, aleatorios. Una teoría sólo es buena en la medida en que comprime los datos hasta crear un sistema, mucho menor, de hipótesis teóricas y de reglas de deducción.

Así pues, podríamos definir lo aleatorio como lo que no puede ser comprimido. La única forma de describirle a alguien un objeto o un número que es com-


Somos un equipo: yo acentúo lo positivo y él elimina lo negativo.

pletamente aleatorio consiste en exhibírselo y decirle: "Aquí lo tienes". Dado que carece de estructura o de regularidad, no existe otra descripción más concisa. En el otro extremo se encuentran los objetos o los números que poseen una gran regularidad. Podría describirse uno de ellos diciendo, por ejemplo, que consiste en un millón de repeticiones de 01. He aquí un objeto muy grande que admite una descripción muy breve.

Mi idea consistía en utilizar la complejidad, medida por el tamaño de programa, para definir la aleatoriedad. Y en cuanto se empieza a examinar el tamaño de los programas de ordenador —en cuanto se toma en cuenta la noción de tamaño de programa o de complejidad de información en lugar de la de complejidad determinada por el tiempo de ejecución—, se produce un fenómeno interesante: allí donde miremos, encontraremos incompletitud. ¿Por qué? Porque la primera pregunta que se hace en mi teoría ya nos crea un conflicto. La complejidad de algo se mide por el tamaño del mínimo programa de ordenador que permite calcularlo. Pero, ¿cómo podremos estar seguros de que tenemos el mínimo programa? La respuesta es que no podremos. No es poco sorprendente: esa tarea escapa del alcance del razonamiento matemático.

La demostración de por qué es así resulta un tanto prolija, por lo que me limitaré a mencionar el resultado, que es uno de mis enunciados de incompletitud favoritos: Si tenemos n bits de axiomas, nunca será posible demostrar que un programa es el más breve posible si su tamaño supera n bits. Es decir, tendremos dificultades con un programa en cuanto sea de mayor tamaño que una versión computarizada de los axiomas; o más exactamente, si es mayor que el tamaño del programa de comprobación-demostración de los axiomas y de las reglas de deducción asociadas.

Resulta así que no es posible, en general, calcular la complejidad medida por el tamaño de programa, porque determinar la complejidad medida por el tamaño de programa de algo equivale a conocer el tamaño del más conciso de todos los programas que la calculan. Tal conocimiento no es posible si el programa es más extenso que los axiomas. Si hay n bits de axiomas, nunca se podrá determinar la complejidad medida por el tamaño de programa de nada que tenga más de n bits de complejidad, que es casi todo.

Explicaré por qué afirmo tal cosa. Los conjuntos de axiomas que normalmente utilizan los matemáticos son bastante concisos, pues de no serlo nadie creería en ellos. En la práctica, hay un vasto mundo de verdades matemáticas —una cantidad infinita de información— mientras que, por otra parte, cualquier conjunto dado de axiomas solamente abarca una cantidad finita, diminuta, de esa información. Tal es la razón, en pocas palabras, de que el teorema de incompletitud de Gödel sea, no misterioso y complicado, sino natural e inevitable.

¿Adónde, ahora?

Esta conclusión es muy impresionante. En sólo tres pasos se va desde Gödel, donde tan chocante resultaba ya que existiesen límites al razonamiento, a Turing, donde ya parecía mucho más razonable, y de Turing a una consideración de la complejidad medida por el tamaño de programa en la que la incompletitud, los límites de la matemática, no pueden sernos ya más notorios.

Suelen decirme: "Todo eso está muy bien. La teoría de información algorítmica es una bonita teoría; pero ahora no estaría de más un resultado concreto que escape, a su juicio, del alcance del razonamiento matemático". Durante muchos años, una de mis respuestas favoritas era: "Tal vez el Ultimo Teorema de Fermat". Pero en 1993, Andrew Wiles se presentó con una demostración. Contenía un paso en falso, pero ahora nadie duda de que sea correcta. La teoría algorítmica de la información hace ver que existen montones de cosas que no es posible demostrar, pero no permite llegar a una conclusión sobre cuestiones matemáticas sueltas.

¿Cómo es posible que, a pesar de la incompletitud, los matemáticos estén logrando tantísimos progresos? Sin duda, estos resultados de incompletitud parecen llevar consigo sentimientos pesimistas. Tomados sin más, podría parecer que no hay forma de avanzar, que la matemática es imposible. Felizmente para quienes nos dedicamos a la matemática, no parece que se cumpla esa condenación. Quién sabe: tal vez algún joven metamatemático de la próxima generación nos haga ver por qué ha de ser así.

Bibliografía complementaria

LA DEMOSTRACIÓN DE GÖDEL. E. Nagel y J. R. Newman, en *Sigma, el mundo de las matemáticas*, vol. 5, págs. 57-84. Editorial Grijalbo. Barcelona. 1958.

RANDOMNESS AND MATHEMATICAL PROOF. G. J. Chaitin, en *Scientific American*, vol. 232, n.º 5, págs. 47-52; 1975.

GÖDEL, ESCHER, BACH: AN ETERNAL GOLDEN BRAID. D. R. Hofstadter. Basic Books; Nueva York, 1979.

ARITMÉTICA Y AZAR. G. J. Chaitin, en *Investigación y Ciencia*, n.º 144, págs. 44-50; septiembre de 1988.

GÖDEL: A LIFE OF LOGIC. H. L. Casti W. DePauli. Cambridge, Massachusetts, Perseus Publishing, 2000.

Parásitos cerebrales

Ciertos microorganismos saben manipular mejor que nosotros los circuitos nerviosos

Al igual que casi todos los científicos, asisto de vez en cuando a reuniones profesionales, entre ellas, al congreso anual de la Sociedad de Neurociencias, organización que integra a la mayoría de quienes estudian el cerebro en todo el mundo. Se trata de una de las experiencias intelectualmente más aplastantes que cabe imaginar. Alrededor de 28.000 de nosotros, científicos aburridos, atiborrados en un único centro de congresos.

Al poco, tanta compañía hace que te sientas un chiflado: durante toda una semana, vayas a un restaurante, estés en el ascensor o salgas a tomar el aire, tendrás cerca colegas largando con entusiasmo sobre los axones de los calamares. No mucho más sencillo resulta el proceso de averiguar algo sobre la ciencia misma. El congreso suma unas 14.000 comunicaciones y carteles: un volumen de información absolutamente abrumador. Del subconjunto de esos carteles que resulta esencial ir a ver, un montón es inaccesible a causa de las enardecidas multitudes que tienen delante, otro aparece escrito en una lengua que ni siquiera es reconocible e, inevitablemente, un tercero expone cada uno de los experimentos que uno se había propuesto realizar a lo largo de los cinco próximos años.

Y entre todo ello acecha el común y compartido sentir de que a pesar del ejército de nosotros que pueda estar afanándose en el problema, todavía seguimos a la pálpala en cuanto al funcionamiento del cerebro.

Una de las tardes del congreso me había sentado, desalentado, en la escalinata del centro de la convención, pisoteado por tanta información, sintiéndome ignorante. Fijé la mirada en un charco de agua sucia y estancada que había junto a la acera, y caí en la cuenta de que seguramente alguno de los seres microscópicos que lo infestaban sabría más sobre el cerebro que todos nosotros juntos.

Esta idea tan deprimente surgió de un artículo reciente y extraordinario que describe de qué forma controlan ciertos parásitos el cerebro de su hospedador. Casi todos sabemos que las bacterias, los protozoos y los virus cuentan con procedimientos asombrosamente refinados de utilizar los cuerpos de animales para sus fines propios. Para medrar asaltan nuestras células; expolian nuestra energía, y se valen de nuestra forma de vivir.

Pero, por muchos conceptos, la faceta más asombrosa y maligna que tales parásitos han alcanzado por evolución es su capacidad para modificar la conducta del hospedador y encaminarla hacia sus fines. Entre los ejemplos que acostumbran citarse se numeran los ectoparásitos, organismos que colonizan la superficie del cuerpo. Por ejemplo, ciertos ácaros del género *Antennophorus* cabalgan a lomos de las hormigas; por frotación de las mandíbulas de éstas, logran provocar un reflejo que culmina cuando la hormiga regurgita alimento, del que se nutre el ácaro. Una especie de oxiuro del género *Syphacia* deposita sus huevos en la piel de los roedores. Los huevos segregan una sustancia urticante, el roedor se rasca con los dientes la zona irritada, los huevos son ingeridos en el proceso y, una vez en el seno del animal, eclosionan.

Estas modificaciones conductuales son inducidas, en esencia, por molestias causadas al hospedador que redundan en beneficio del agresor. Pero algunos parásitos perturban el funcionamiento del sistema nervioso. En ocasiones logran tal efecto de forma indirecta, por manipulación de hormonas que lo afectan. Existe un tipo de crustáceos, unos percebes de Australia (*Sacculina granifera*), que se adhieren a los machos del cangrejo de la arena y segregan una hormona feminizante que induce en el cangrejo comportamientos maternales. Los cangrejos "poseídos" migran hacia el mar con las hembras cluecas y hacen depresiones en la arena que resultan ideales para la dispersión de las larvas. Los cangrejos machos no depositarán ninguna, claro está. Pero los percebes, sí. Y si un percebe infecta a una hembra, induce en ella el mismo comportamiento... tras atrofiarle los ovarios, práctica que se conoce por castración parasitaria.

Por curiosos que sean estos casos, al menos los organismos parasitarios permanecen en el exterior del cerebro. Hay, no obstante, unos pocos que sí se infil-



JACK UNRUH

tran en el mismo. Se trata de seres microscópicos, virus en su mayoría, no de criaturas que serían gigantescas en comparación con ellos, como los ácaros, los oxiuros o los percebes. Cuando alguno de estos diminutos parásitos se ha introducido en el cerebro, se halla a salvo de los ataques del sistema inmunitario y puede dedicarse a desviar maquinaria neuronal para que actúe en su interesado beneficio.

Uno de tales parásitos es el virus de la rabia. Aunque las acciones de este virus han sido reconocidas desde hace siglos, nadie, que yo sepa, las ha encuadrado en el marco neurológico que voy a describir. Eran muchas las formas en las que el virus de la rabia pudo haber evolucionado para trasladarse de unos a otros hospedadores. El virus no tenía necesidad alguna de aproximarse al cerebro. Podría haber recurrido a un truco similar al de los agentes responsables del resfriado nasal, a saber, la irritación de las terminaciones nerviosas de las vías nasales, que provocan el estornudo en el hospedador y el rociado por doquier de réplicas del virus. El virus podría haber inducido un deseo insaciable de lamer a otra persona o animal, transfiriendo así especímenes inmersos en la saliva. En lugar de eso, como todos sabemos, la rabia suele provocar que su hospedador se vuelva agresivo, de modo que el virus puede trasladarse a un nuevo huésped por la saliva que impregna las heridas.

Reflexionemos sobre esto. Son muchos los investigadores que estudian el fundamento neurológico de la agresión: qué vías cerebrales participan, cuáles son los neurotransmisores correspondientes, las interacciones que existen entre los genes y el ambiente, la modulación por hormonas, y así por menudo. La agresión ha engendrado congresos, tesis doctorales, altercados académicos, intrigas para ser numerario. Entretanto, el virus de la rabia “ha sabido” qué neuronas debía infectar para que la víctima sea rábica. Que yo tenga noticia, ningún neurocientífico ha estudiado la rabia con la intención específica de comprender la neurobiología de la agresión.

Por impresionantes que sean estos efectos víricos, se pueden perfeccionar, debido a la inespecificidad del parásito. Un animal rabioso podría morder a alguna de las pocas criaturas en las que la rabia no se replica bien, como el conejo. Por ello, aunque los efectos conductuales de la infección del cerebro sean asombrosos, si el impacto del parásito resulta desmesurado, puede acabar en un hospedador que le deje en vía muerta.

Lo cual nos lleva a un precioso caso de control cerebral específico y al artículo que mencioné anteriormente, de Manuel Berdoy y sus colegas de la Universidad de Oxford. El equipo de Berdoy estudia un parásito llamado *Toxoplasma gondii*. En una utopía toxoplásmica, la vida consiste en una secuencia bifásica de hospedadores, con participación de roedores y de gatos. El toxoplasma, un protozoo, es ingerido por un roedor, en cuyo cuerpo forma quistes por doquier, especialmente en el cerebro. El roedor es devorado por un gato, dentro del cual se reproduce el organismo toxoplasma. El gato expulsa al parásito en sus heces, las cuales, por uno de esos ciclos que hay en la vida, son mordisqueadas por un roedor. El plan completo depende de la especificidad: el gato es la única especie en la que el toxoplasma puede reproducirse sexualmente y ser expulsado. Así pues, al toxoplasma no le iría bien que el roedor que lo porta fuera cazado por un halcón, o que las heces gatunas fueran ingeridas por un escarabajo pelotero. Observemos: el parásito puede infectar a toda suerte de otras especies; pero si quiere difundirse hasta un nuevo hospedador tiene, sin remedio, que dar con un gato.

Esta capacidad para infectar a otras especies es la razón de que el lote de libros que explican “lo que se debe hacer durante el embarazo” recomienden prohibir que estén en casa el gato y su cajón de limpieza, y previenen a la embarazada contra la jardinería si hay gatos que merodeen por la zona. Si el toxoplasma procedente de las heces del gato invade a la futura mamá, cabe la posibilidad de que llegue hasta el feto y cause lesiones en su sistema nervioso. La ges-

tante que sabe lo que se hace teme al gato, no al ratón. Los roedores infectados por toxoplasma manifiestan, en cambio, la reacción contraria. El extraordinario truco del parásito ha consistido en lograr que los roedores infectados no sean asustadizos.

Todo roedor detesta al gato, una conducta que en etología recibe el nombre de "pauta de acción intrínseca", pues no se debe a que el roedor desarrolle su aversión por aprendizaje de sus experiencias previas (no es probable que los errores de los ratones a este respecto puedan proporcionarles lecciones duraderas). Por el contrario, la fobia a los felinos está implantada genéticamente. Y es desencadenada por el olfato, en forma de feromonas, señales odoríferas que los animales liberan. Los roedores rehúyen instintivamente el olor del gato; incluso los roedores que no han visto un gato en su vida, ratones descendientes de cientos de generaciones de animales de laboratorio. Pero no así los infectados por toxoplasma. Como han demostrado Berdoy y su grupo, estos roedores pierden selectivamente su aversión, y su temor, a las feromonas del gato.

Ahora bien, no se trata del caso genérico de un parásito que enreda en la cabeza del hospedador intermediario y le torna desconcertado y vulnerable. En los roedores, parece que todos los demás aspectos subsisten intactos. En la jerarquía de dominancia, el estatuto social del animal no se modifica. Sigue interesado en aparearse y, por tanto, en las feromonas del sexo opuesto. Los roedores infectados siguen siendo capaces de distinguir otros olores; sólo que no les aterran las feromonas del gato. Parece increíble. Es como si una persona fuese infectada por un parásito cerebral que no tiene efecto alguno sobre sus pensamientos, emociones, calificaciones en las pruebas de selectividad, o sus gustos de televisión, pero que, para completar su ciclo biológico, experimentase un irresistible deseo de ir al zoológico, saltarse las vallas y besar al oso polar de aspecto más deprimente. Una atracción fatal inducida por parásito, como señalaba el equipo de Berdoy en el título de su artículo.

Obviamente, se requiere una investigación más completa, pues se trata de un descubrimiento tan intrínsecamente novedoso, que es imprescindible que se averigüe cómo opera. Y porque —permítaseme un pensamiento de Stephen Jay Gould— nos da cada vez más pruebas de lo asombrosa e impresionante que es la evolución, en formas chocantes a la intuición. Muchos de nosotros tenemos hondamente atrincherada la idea de que la evolución es direccional y progresiva: los invertebrados son más primitivos que los vertebrados; los mamíferos, los vertebrados más evolucionados; los primates, los mamíferos genéticamente más completos; y así sucesivamente. Grave error.

Recordemos, pues: hay por ahí criaturas capaces de controlar cerebros. Organismos microscópicos unos, y mayores otros. Mi reflexión en un charco de la acera me llevó a la conclusión opuesta a la que sacó Narciso de su acuático reflejo. Nos hace falta humildad filogenética. No somos, ciertamente, ni la especie más evolucionada que existe, ni la menos vulnerable. Ni tampoco la más lista.

ROBERT SAPOLSKY

Procesado óptico de información

Solitones de cavidad

Un medio óptico no lineal es aquel cuyas propiedades ópticas —por ejemplo, el índice de refracción o el coeficiente de absorción— dependen de la intensidad de la luz. La luz que se propaga en dichos sistemas no lo hace de igual manera cuando es débil que cuando es intensa. Ello produce fenómenos sorprendentes, como la auto-focalización de la luz en medios Kerr, en la que un pequeño haz de suficiente potencia se propaga sobre grandes distancias sin experimentar un aumento en su diámetro debido a la difracción.

Los efectos ópticos no lineales adquieren particular relevancia en los

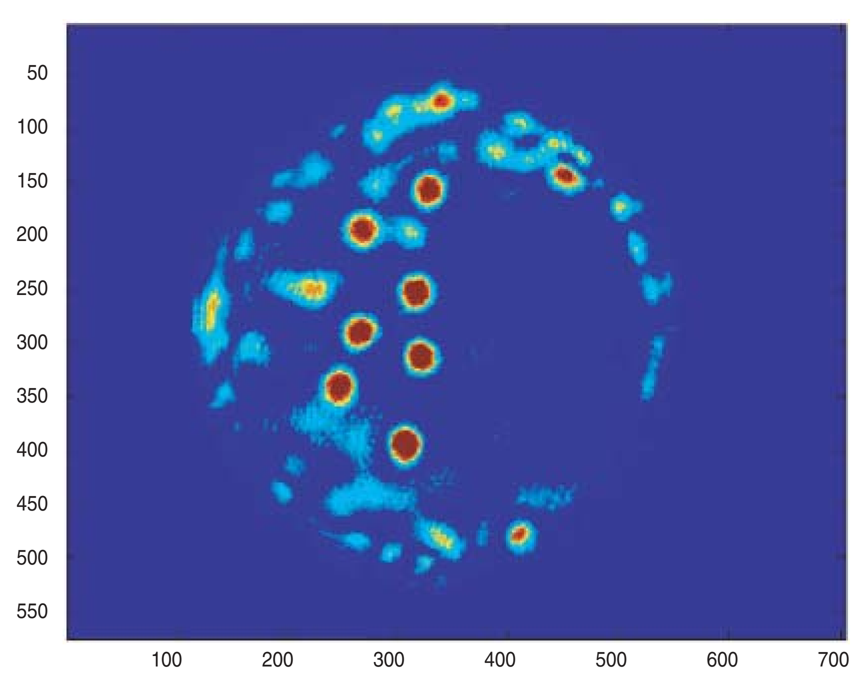
llamados sistemas activos, donde el medio recibe un aporte externo de energía que puede transferir al campo óptico, aumentando así su potencia (amplificación óptica). Cuando el amplificador óptico se realimenta mediante dos espejos que definen una cavidad, es factible alcanzar los niveles de intensidad luminosa necesarios para tener una fuerte interacción no lineal entre el medio y la luz. Debido a ella, en sistemas de este tipo se ha podido observar, al iluminar con un haz de luz de intensidad constante, que los haces transmitido o reflejado pueden exhibir tanto biestabilidad óptica como oscilaciones temporales.

Una gama más rica de comportamientos asociada a los efectos no lineales aparece cuando la cavidad óptica es más ancha que larga (alto número de Fresnel), puesto que en este caso la interacción no lineal puede inducir la formación espontánea de una distribución espacial no homogénea ("pattern") en los haces reflejado y transmitido. En determinadas condiciones, esta distribución consiste en un número arbitrario de puntos luminosos de características bien definidas (llamados solitones de cavidad, CS) sobre un fondo homogéneo de baja intensidad.

Las propiedades esenciales de los CS son:

- biestabilidad: para el mismo nivel de inyección óptica, los CS pueden estar o no encendidos; ello significa que pueden activarse y desactivarse por efecto de perturbaciones;
- independencia mutua: cada CS puede activarse y desactivarse individualmente sin perturbar al resto de CS presentes en el sistema ni al fondo homogéneo;
- forma robusta: la distribución de luz de un CS está determinada por la interacción no lineal entre la luz y el medio, por lo que no son sensibles a la geometría de la cavidad, y
- la posición de los CS está determinada por las características del haz homogéneo inyectado en la cavidad.

Estas propiedades hacen de los CS interesantes candidatos para el almacenamiento y procesado de información por métodos puramente ópticos. Formando una matriz de CS



1. Matriz de dos columnas de 4 y 3 CS en un VCSEL de 150 micrometros de diámetro

en posiciones prefijadas (*véase la figura 1*), podemos almacenar ópticamente información en forma binaria (cada CS correspondiendo a un "bit"). Además, podemos procesar dicha información por métodos puramente ópticos, puesto que la perturbación que activa o desactiva los CS puede ser en forma de luz.

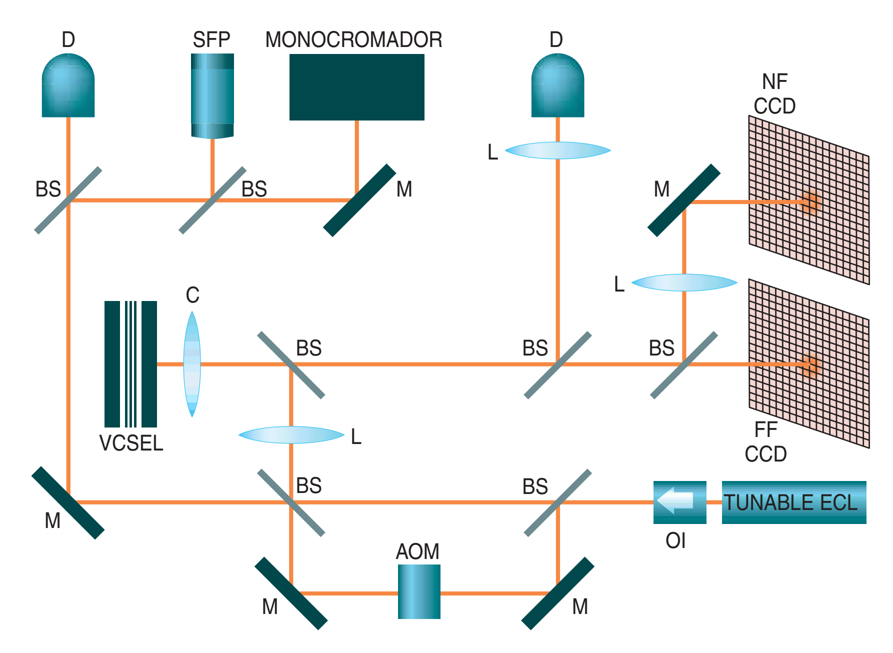
Por último, dado que las posiciones de los CS están determinadas por las características del haz inyectado, variando éstas podemos reconfigurar a voluntad la matriz de CS. Así, una serie temporal de pulsos ópticos aplicados en un punto del dispositivo puede usarse para generar una secuencia espacial de CS, lo que constituye el principio de funcionamiento de los conversores serie/paralelo y de los registros de desplazamiento.

Este potencial de aplicaciones ha estimulado los esfuerzos de investigación necesarios para la obtención de CS en dispositivos de semiconductor, lo que permitiría su integración en circuitos electrónicos. Recientemente, un equipo internacional formado por científicos del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA CSIC-UIB, España), el Instituto No Lineal de Niza (INLN, Francia), el Instituto Nacional de Física de la Materia (INFM, Italia) y la Universidad de Ulm (Alemania) hemos demostrado la formación y control de CS en dispositivos de semiconductor.

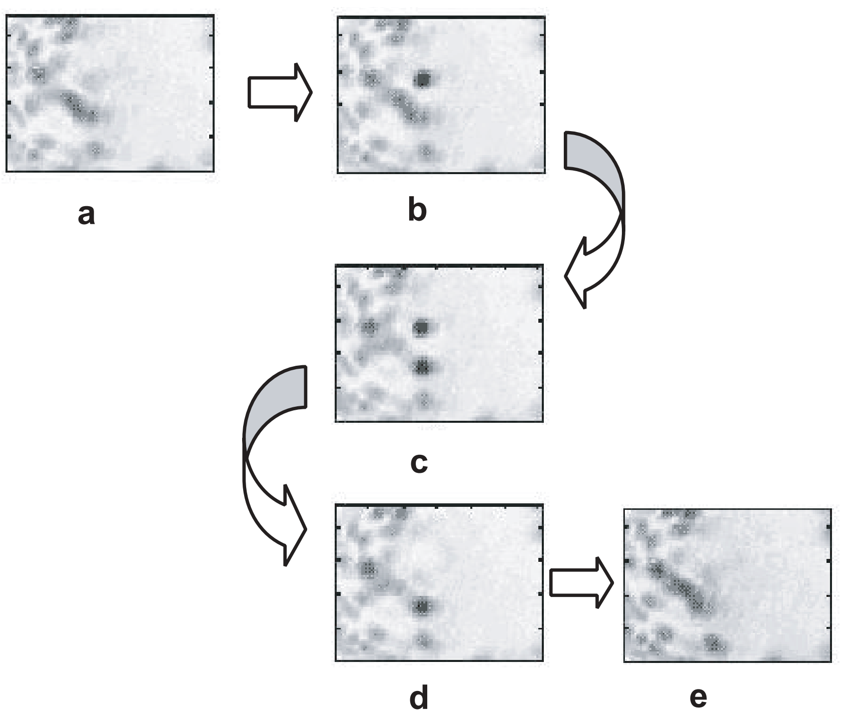
El dispositivo utilizado es un láser de cavidad vertical y emisión superficial (VCSEL) de 150 micrometros de diámetro, en el que hay tres capas finas de material semiconductor en el interior de la cavidad óptica definida por dos espejos de alta reflectividad separados por una distancia de aproximadamente 0,5 micrometros.

El VCSEL dispone de dos contactos a través de los cuales se aporta energía eléctrica para controlar el grado de interacción no lineal entre el medio activo y la luz inyectada. Esta proviene de un láser externo, y consta de dos partes: una, homogénea y siempre inyectada en el VCSEL; otra, de pequeño diámetro (aproximadamente 10 μm) y que puede iluminar cualquier punto del dispositivo e interrumpirse a voluntad (*véase la figura 2*). Usamos este segundo haz, llamado de escritura, para generar la perturbación que activa o desactiva los CS, es decir, para escribir y borrar la información.

La figura 3 demuestra la generación y control de una matriz de dos CS en el sistema, generando los cuatro estados binarios posibles. La figura 3a corresponde a la intensidad del haz reflejado cuando



2. Esquema experimental utilizado para la generación y control de CS en un VCSEL de área ancha. Tunable ECL: láser de cavidad externa sintonizable, OI: diodo óptico, AOM: modulador acusto-óptico, HB: haz de homogéneo, WB: haz de escritura, SFP: rastreo Fabry-Pérot, NF CCD: cámara de dispositivo de acoplamiento de carga para detección del haz reflejado, L: lente, M: espejo, BS: divisor de haz, D: detector



3. Intensidad del haz reflejado en escala de grises invertida (blanco: mínima intensidad, negro: máxima intensidad) para distintas etapas del proceso de generación y control de una matriz de 2 CS. En (a) *se muestra el estado del sistema antes de la generación de los CS, uno de los cuales se enciende mediante la aplicación de un corto pulso óptico* (b). *A continuación, se genera en otra posición un segundo CS* (c). *Mediante otro pulso óptico situado sobre el primer CS éste se apaga y permanece sólo el segundo* (d), *que se apaga por el mismo procedimiento para recuperar el estado original del sistema* (e)

sólo se aplica el haz homogéneo. Mediante la aplicación de un pulso corto del haz de escritura, se crea un CS en el centro del VCSEL, que permanece al apagar el haz de escritura (*figura 3b*). A continuación, se desplaza el haz de escritura a otra posición, donde se genera un segundo CS mediante la aplicación de otro pulso (*figura 3c*). Resituando el haz de escritura sobre el primer CS, lo apagamos mediante otro pulso óptico y permanece sólo el segundo (*figura 3d*), el cual se apaga por el mismo procedimiento para recuperar el estado original del sistema (*figura 3e*).

Las características de los CS para almacenamiento y procesado elemental de información por medios puramente ópticos encuentran un marco natural de aplicación en las redes de comunicaciones ópticas. En ellas, estos pasos inevitables se realizan actualmente de forma electrónica, lo que requiere la conversión previa de la información del dominio óptico al electrónico y —una vez procesada— su posterior reconversión a luz. El uso de dispositivos basados en CS no requiere de estas dos conversiones, lo que debería permitir aumentar la velocidad y abaratar costes, y añade versatilidad al sistema por su capacidad de reconfiguración.

Stéphane Barland,
Massimo Giudici
y Jorge R. Tredicce
Instituto No Lineal de Niza
Salvador Balle
Instituto Mediterráneo
de Estudios Avanzados,
Esporles, Baleares

Plantas resistentes

Arroz genéticamente mejorado

El taladro del arroz (*Chilo suppresalis*) es un lepidóptero cuya larva se introduce en el tallo de la planta y arrasa la producción.

En Europa el arroz acostumbra cultivarse en zonas de interés ecológico. Ello significa que el uso de

sustancias químicas puede ejercer un impacto negativo en los ecosistemas. Las variedades modificadas mediante la introducción de genes de resistencia pueden contribuir, de forma positiva, al mantenimiento de la integridad de tales espacios protegidos, además de ahorrar en costes de producción.

Con ese propósito, nuestro Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias (IRTA) colabora en el desarrollo del ERRI (Modificación por Ingeniería Genética del Arroz para Conferirle Resistencia contra los Insectos), un proyecto europeo de 4 años de duración, en el que participan también científicos de un centro francés y de otro italiano, junto con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Mediante transformación genética se han incorporado, en las variedades arroceras mediterráneas Senia y Ariete, genes insecticidas del tipo *cry* (*cry*1B o *cry*1Aa) que codifican la expresión de las toxinas de *Bacillus thuringiensis*. Las líneas obtenidas se han mostrado resistentes al taladro, lo mismo en los ensayos de laboratorio e invernadero que en el campo. Hemos obtenido también plantas transgénicas de ambas variedades con el gen inhibidor de proteasas del maíz (*mpi*); éste, al bloquear el proceso digestivo, produce un significativo retraso en el crecimiento de las larvas del taladro.

El proyecto europeo no se limita, sin embargo, a conseguir plantas transgénicas de arroz resistentes al taladro. Se propone, además, lograr que las variedades resultantes sean inocuas para el medio y aceptadas por los consumidores. De ahí que se aborden el estudio de promotores inducibles por herida, la eliminación de los genes de selección (resistencia contra los antibióticos) y la evaluación del riesgo de flujo de genes.

Veamos uno por uno. El promotor de un gen controla cuándo y dónde se expresa el gen. Se busca, pues, que el gen se active sólo cuando se produzca el ataque y que esta expresión quede limitada al tejido afectado por el patógeno. Así acontece con el promotor del gen *mpi* del maíz, que dirige la expresión de los genes *cry* de suerte tal, que la toxina sólo se produce en los tejidos atacados (heridos) por el taladro.

Importa, en segundo lugar, la eficacia de la estrategia seguida para eliminar los genes de selección. La nueva variedad obtenida ha de presentar sólo el gen insecticida, eliminándose el gen de resistencia contra los antibióticos. Por eso, los genes se integran en *loci* distintos; al segregarse en la descendencia, posibilitan la selección de las plantas que han incorporado el gen insecticida.

¿Qué decir, por fin, del riesgo de flujo de genes entre variedades cultivadas y, sobre todo, desde éstas hacia el arroz salvaje? Aunque el arroz se multiplica por autofecundación, existe siempre cierta tasa de reproducción cruzada. Así pues, ante la posibilidad de establecer campos de cultivo de plantas transgénicas es necesario evaluar hasta qué punto existe el riesgo de que el polen de las plantas transgénicas pueda fecundar plantas no transgénicas, con la transmisión consiguiente de los genes incorporados. Por otra parte, en Europa existe una mala hierba, el arroz salvaje, que es compatible con el arroz cultivado y que podría adquirir los genes introducidos a través del polen.



1. *Ensayo de campo para evaluar el flujo de genes a través del polen*

La evaluación del flujo de genes se ha realizado mediante tres ensayos de campo en forma de círculos concéntricos. Se intercalaban plantas transgénicas (resistentes al herbicida glufosinato de amonio), plantas no transgénicas de la misma variedad y plantas de arroz salvaje.



2. *Regeneración* in vitro *de plantas transgénicas de arroz*

De los ensayos se desprendía una clara influencia del viento en la polinización. Se observó también un flujo genético de plantas transgénicas a no transgénicas de la misma variedad, que decrece drásticamente con la distancia entre ambas (inferior al 0,1 % a 1 m de distancia, del 0,01 % a 5 m y prácticamente nulo a 10 m).

Estos resultados permiten diseñar una estrategia para impedir la transferencia de genes hacia campos vecinos de plantas no transgénicas. En cuanto al arroz salvaje, aunque la tasa de flujo genético detectada fue muy baja (0,072 %), revela que se deberán establecer técnicas de control de esta mala hierba si se quiere evitar que los genes introducidos se incorporen a ella en el transcurso de varios años de cultivo.

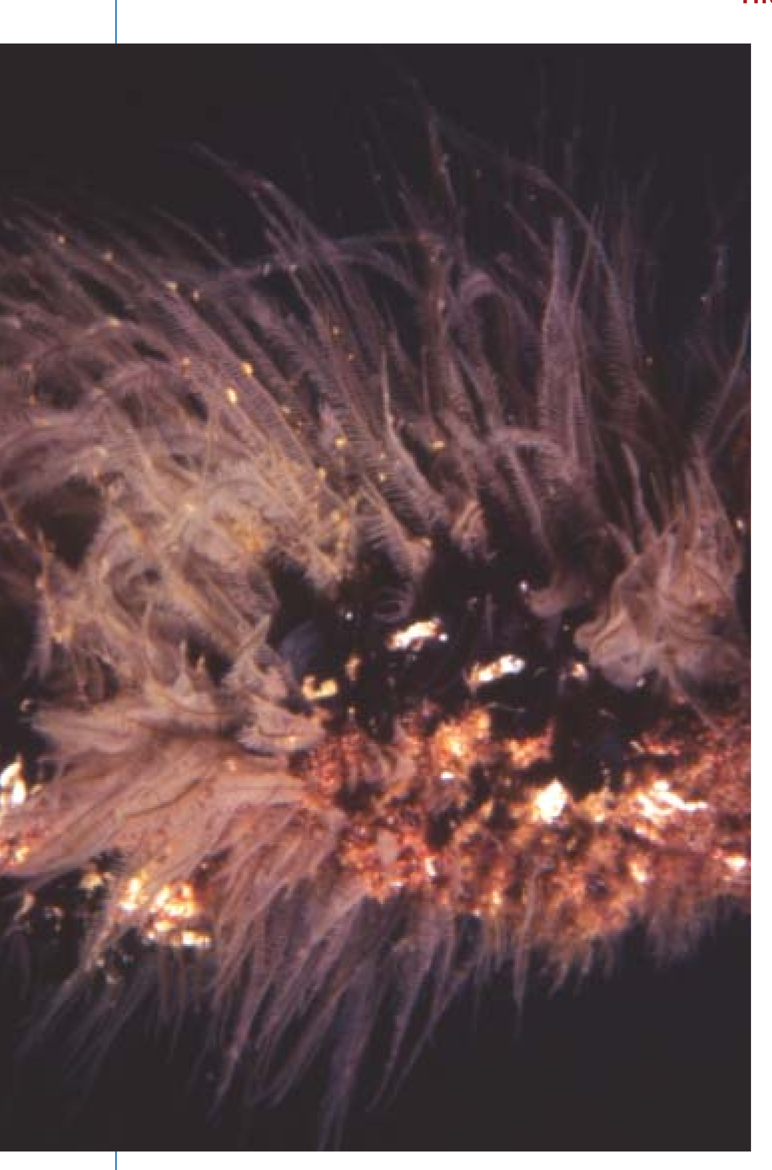
Así pues, el desarrollo de este proyecto ha permitido la obtención de plantas de arroz resistentes al taladro. El estudio de la incorporación de promotores inducibles y la eliminación de los genes de resistencia a antibióticos, entre otros factores, favorecerán la aceptación por parte de la sociedad de estos nuevos productos. Finalmente, los estudios de cuantificación de flujo genético pueden aportar estrategias válidas para cultivar las nuevas variedades en el campo, minimizando el flujo genético debido al polen.

JOAQUIMA MESSEGUER
y ENRIC MELÉ
Dpto. de Genética Vegetal.
Centro de Cabrils. IRTA

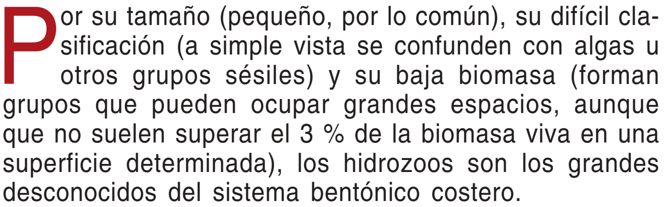
DE CERCA

Sergio Rossi

Hidrozoos



1. *Cuando en la columna de agua abunda el alimento (en primavera), los hidrozoos pueden monopolizar durante breves períodos el espacio. Aquí una Aglaophenia sp. está a punto de concluir su ciclo; las bolitas marrón claro son los gonóforos*



Por su tamaño (pequeño, por lo común), su difícil clasificación (a simple vista se confunden con algas u otros grupos sésiles) y su baja biomasa (forman grupos que pueden ocupar grandes espacios, aunque que no suelen superar el 3 % de la biomasa viva en una superficie determinada), los hidrozoos son los grandes desconocidos del sistema bentónico costero.

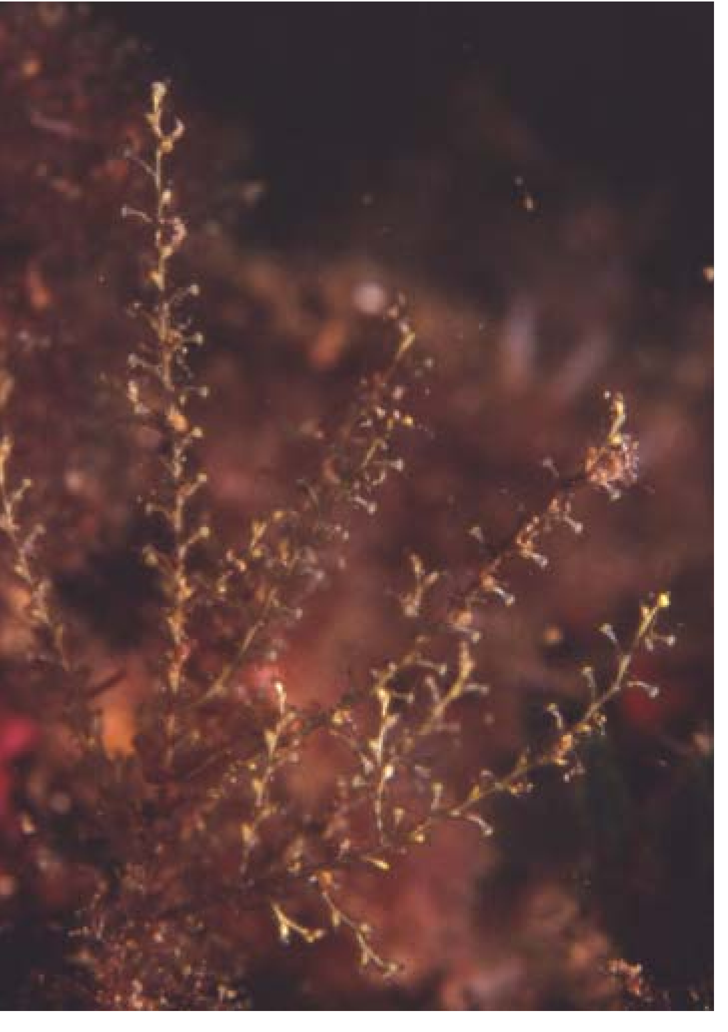
Los hidrozoos que observamos a lo largo de la costa corresponden a un estadio de un ciclo bastante complejo. Se trata del estadio fijo al sustrato, esto es, a rocas, algas, hojas de fanerógama, conchas de caracola, boyas y otros objetos. En su estadio libre, la hidromedusa ejerce de dispersor: flota libre en la columna de agua. Pero, en realidad, ¿quién es el adulto y quién el juvenil?

El desarrollo de los hidrozoos puede repartirse en dos fases diferentes, cada una de las cuales presenta sus propios ciclos biológicos, necesidades alimentarias, competencia y crecimiento. Tales fases son: pelágica (la de la medusa, en la columna de agua) y bentónica (la de los pólipos). Sostienen algunos autores que la hidromedusa es el estadio adulto del ciclo; para otros, el hidropólipo constituye el verdadero adulto, en tanto que las medusas se limitaría a ser un simple transporte de productos sexuales lejos del alcance de las colonias progenitoras.

No se trata de una controversia bizantina. Saber quién precedió a quién nos aclararía la evolución seguida por ese grupo animal. Además, la fase adulta merecería considerarse la reguladora del ciclo. No acaban las repercusiones para la ciencia. Del conocimiento de la filogenia de los hidrozoos se beneficiaría la investigación sobre la filogenia de grupos más complejos. Se explica, pues, el interés reciente sobre los hidrozoos, cuyos acelerados ciclos sexuales (a veces fáciles de controlar en laboratorio), el desarrollo de sus dos capas (epitelio y endotelio) y el de la masa celular intermedia (mesoglea) pueden ayudar a entender claves del origen y función de los tejidos en animales más "evolucionados".



2. *Gracias a las elevadas tasas de ingesta, los hidrozoos crecen de forma acelerada, compitiendo a veces por el espacio con otros organismos de rápido desarrollo como las algas carnosas*



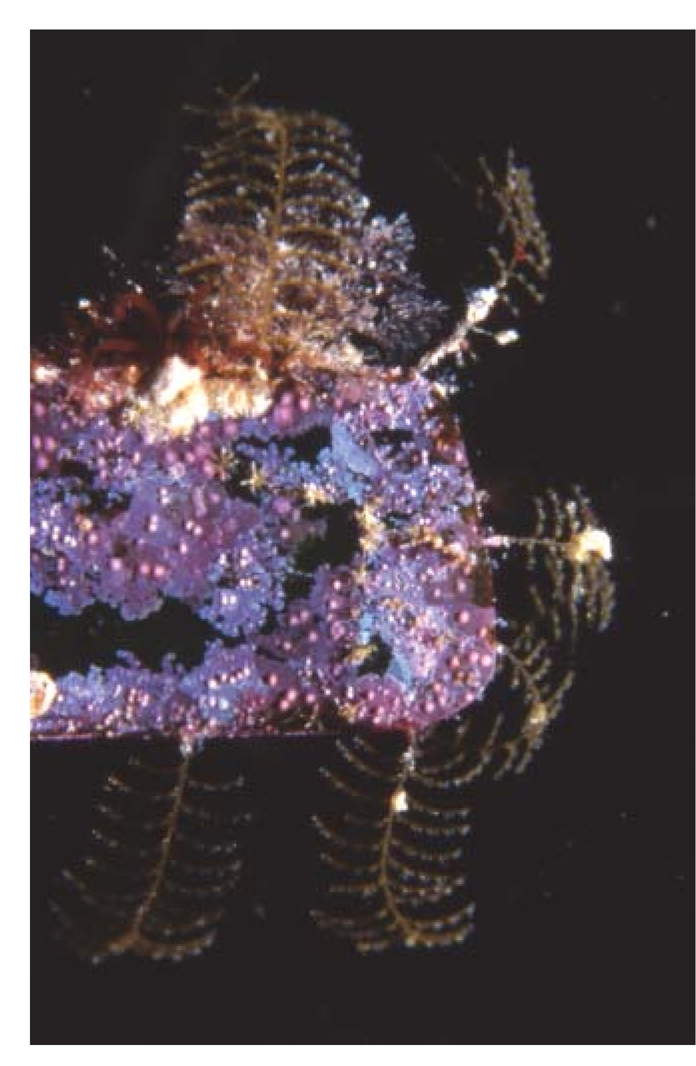
3. Los hidrocaules portan los pólipos; suelen distribuirse de forma simétrica. En los pólipos acostumbra basarse la clasificación de estos organismos



4. Existen dos grandes grupos de hidrozoos: los atecados y los tecados; el criterio de división atiende a la capacidad o incapacidad de retraerse el pólipo en el interior de una teca o cáliz protector. En este caso observamos un hidrozoo atecado sobre el alga modular Halimeda tuna



5. Vida breve de los hidrozoos. Aquí observamos el avance imparable de otros organismos desde la base del hidrocaule de estos hidrozoos tecados



6. La competencia por el espacio es una constante en la vida de estos y de otros organismos. Los contemplamos aquí arracimados en el borde de una hoja tratando de cerrar su ciclo biológico

Auroras negras

Estas regiones desprovistas de luz acompañan a las auroras boreales, de las que son una especie de negativo. Los electrones ionosféricos escapan de ellas; tras de sí dejan agujeros en la densidad electrónica de la atmósfera

Göran Marklund

Las primeras observaciones de las auroras negras con instrumentos ópticos instalados en tierra se remontan a los años setenta. Fue por entonces cuando se acuñó la expresión misma de "aurora negra" para referirse a los arcos, rizos y manchas negros que se apreciaban, bien dentro de las auroras boreales difusas —extensas regiones del cielo polar donde se enciende un vago resplandor—, bien en la interfase entre una aurora difusa y una de esas estructuras impresionantes en que se suele pensar cuando se habla de auroras boreales: un estrecho arco o cinta que ondula en el cielo de horizonte a horizonte y se alza como un telón de luz. Ahora se tiene también por aurora negra a un estrecho filamento negro que ascienda entre dos arcos de aurora —lo que se ve en la *figura 1*.

Durante los veinte años siguientes, pocos fueron los artículos sobre las auroras negras. Se limitaban a describir sus características y morfología tal y como se las discernía gracias a las observaciones ópticas en tierra. Se consideraba el fenómeno una rareza que no merecía mayor atención.

El interés se despertó hará un decenio, cuando se dispuso de las detalladas observaciones del satélite sueco Freja, lanzado en 1992. Las medidas de alta resolución que tomó 1600 km por encima de una aurora boreal y negra descubrieron que la aurora negra distaba de ser un fenómeno pasivo, la mera inexistencia de emisión luminosa en el seno de una aurora boreal; muy al contrario, era el resultado, como las boreales, de unas estructuras de potencial y de corrientes. Para confirmarlo, sólo se necesitaban observaciones terrestres simultáneas con las tomadas por un satélite. En 1998 T. S. Trondsen, de la Universidad de Tromsö, confeccionó un excelente sumario de las observaciones de auroras negras efectuadas con alta resolución espacial y temporal por instrumentos terrestres.

Las estructuras de aceleración

Nos centraremos en los sistemas en que la aurora negra va encajada entre dos arcos de aurora boreal. Los arcos se extienden de este a oeste a lo largo de cientos de kilómetros, pero de ordinario sólo tienen unos cientos de metros de grosor. Forman parte de un anillo, el óvalo auroral, más o menos continuo, bastante ancho, que circunda los polos de la Tierra. Se generan cuando un flujo de electrones de alta energía que desciende, a lo largo de las líneas del campo magnético terrestre, desde la magnetosfera superior alcanza una región situada entre cien y doscientos kilómetros de altura, entre la ionosfera y la magnetosfera (*véase* "La aurora dinámica", de Syun-Ichi Akasofu, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1989). Allí van chocando cada vez con mayor frecuencia, a medida que se adensa la atmósfera, con los átomos y las moléculas que la componen, que así se excitan; al desexcitarse emiten energía en forma de luz. La suma de esas emisiones constituye la aurora boreal.

Los electrones que excitan los átomos sufren en una parte de su descenso la aceleración que les imparte un campo eléctrico dirigido hacia arriba (como los electrones tienen carga negativa, los propulsa hacia abajo) y antiparalelo al campo magnético terrestre (el cual, a grandes latitudes, apunta casi verticalmente hacia tierra). Ese campo se encuentra entre los 5000 y los 8000 km de altura. (Las auroras difusas, en cambio, están generadas por electrones sin acelerar que descienden hacia tierra con energías de alrededor de 1 keV.)

El intervalo de las altitudes donde actúa el campo eléctrico acelerador dirigido hacia arriba recibe el nombre de región de aceleración. Se halla en la parte inferior de una estructura de potencial eléctrico cargada negativamente, con forma de U; allí, donde se cierra la U, las equipotenciales son perpendiculares al campo magnético (y como el campo eléctrico es, a su vez,

1. UNA AURORA NEGRA vista desde el suelo, emparedada entre dos arcos aurorales orientados en sentido este-oeste.

perpendicular a las líneas equipotenciales, se alinea con el campo magnético de la Tierra). Pero con esa forma de U, a grandes altitudes, en las partes altas de las ramas de la U, las equipotenciales son paralelas al campo magnético; los campos eléctricos apuntan allí, pues, perpendicularmente a éste. La forma en U se ha deducido de los datos, relativos al campo eléctrico y a las partículas, proporcionados por numerosos satélites que describen órbitas más allá de la ionosfera, incluso a varios radios terrestres de altitud.

Pues bien: sobre la zona donde se manifiesta la aurora negra se levanta asimismo una *estructura de potencial eléctrico, pero cargada positivamente,* una U también, sólo que con las direcciones de los campos eléctricos y las corrientes invertidas en comparación con las correspondientes a los arcos. La región aceleradora aneja a la aurora negra se encuentra también en el fondo de esa U y consiste en un campo eléctrico paralelo al campo magnético terrestre: apunta hacia abajo y, por tanto, acelera los electrones hacia arriba. Se genera de esa manera un flujo de electrones que ascienden por las líneas del campo magnético y escapan de la ionosfera. El resultado es la creación de un agujero en la densidad electrónica ionosférica, tal y como observó el Freja, precisamente donde se manifiesta la aurora negra, por encima de los 100 kilómetros de altitud. Eso sí, la región aceleradora aneja a la aurora negra se halla por lo común a una altura de entre 1500 y 3000 km, es de-



cir, bastante menor que la asociada a los arcos.

Un satélite que sobrevuele a miles de kilómetros de altura las regiones de aceleración de los arcos y de la aurora negra observará una serie de rasgos bipolares en los campos eléctricos (una punta positiva seguida de una punta negativa). Encima de los arcos, allá donde las líneas equipotenciales son ya paralelas al campo magnético terrestre, las líneas del campo eléctrico apuntan unas hacia otras (campos eléctricos convergentes); sobre la aurora negra, en cambio, se separan (campos eléctricos divergentes).

El sistema de corrientes aurorales

La aurora boreal y la negra constituyen, pues, manifestaciones ionosféricas ópticas de procesos conectados entre sí dentro de un único sistema de corrientes. Los electrones descendentes acelerados que producen la aurora boreal corresponden a la rama ascendente de ese sistema —el vector de corriente asociado a un flujo de cargas negativas apunta en sentido contrario al movimiento de éstas—, y los flujos ascendentes de electrones ionosféricos, asociados a la aurora negra, constituyen la rama descendente de la corriente, o corriente auroral de retorno. Una corriente que fluye perpendicularmente al campo magnético conecta en la ionosfera estas dos corrientes dirigidas en sentidos opuestos y guiadas por el campo magnético terrestre; la transportan sobre todo iones.

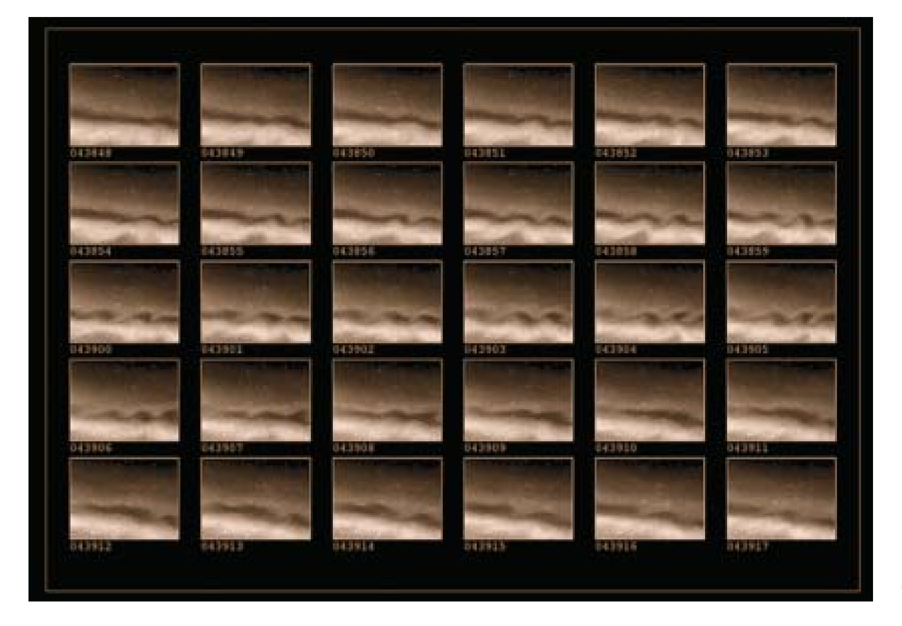
El impulsor último de este sistema de corrientes aurorales es el viento solar, corriente constante de partículas cargadas, sobre todo electrones y protones, proyectada desde el Sol radialmente a velocidades, una vez han alcanzado la órbita de la Tierra, del orden de 300 km/s. Cuando inciden en las partes más altas de la magnetosfera terrestre, que constituye un enorme obstáculo para la corriente del viento solar, se transfieren del viento solar a la magnetosfera tanto partículas como energía. La eficacia de este proceso depende en gran medida de las condiciones del viento solar; la variable más importante es la dirección del campo magnético del viento solar. Como resultado de esas interacciones se establece una caída de potencial a través de la magnetosfera, dirigida de levante a poniente, del orden de 100 kV. Este generador alimenta corrientes hacia y desde la Tierra; entre ellas, las del circuito de corrientes aurorales. La naturaleza de esta interacción, y en particular del generador, resulta, sin embargo, un asunto muy complicado que cae fuera del ámbito de este artículo. En la actualidad se la está investigando a fondo con las mediciones simultáneas de los cuatro vehículos espaciales idénticos del programa Cluster.

La evolución temporal

Las mediciones efectuadas por los satélites han mostrado que los potenciales de aceleración asociados a las auroras boreal y negra presentan la máxima intensidad durante el invierno, a medianoche, cuando la densidad electrónica ambiente y la densidad electrónica ionosférica son bajas. Comprenderemos el porqué si suponemos, por mor de la sencillez, que las corrientes producidas por el generador externo conservan una magnitud constante. Para mantener una corriente dada cuando el número de transportadores de carga es bajo, se establecerá un campo eléctrico que acelere los electrones hasta grandes velocidades. Esta es la razón por la que se observan con mayor frecuencia potenciales elevados de aceleración durante el invierno y en la parte nocturna del óvalo auroral. En esas circunstancias, además, las regiones de aceleración tienden también a desplazarse

El autor

GÖRAN T. MARKLUND es director de investigación espacial experimental del Laboratorio Alfvén del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, donde además es profesor de física del plasma espacial. Ha sido investigador principal del medidor del campo eléctrico de los satélites *Viking* y *Freja*, investigador científico del microsatélite Astrid-2 y coinvestigador para el campo eléctrico y experimentos de ondas de la misión *Cluster*. En 1993 le fue otorgado el “Wallmarkska Priset” por sus contribuciones científicas y organizadoras a la investigación espacial sueca; concede ese premio la Real Academia de Ciencias de Suecia, de la que es miembro desde 1997.



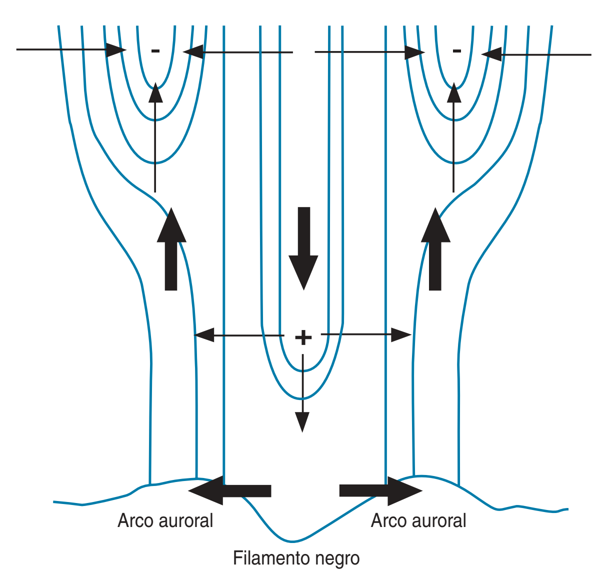
GÖRAN MARKLUND

2. FORMACION DE BUCLES NEGROS en un arco negro, observada por un instrumento sito en tierra. Cada cuadro representa una superficie de aproximadamente 11 km × 9 km. El norte está arriba y el oeste a la derecha. La estrechez del arco (su grosor no pasa del kilómetro) se da en muchas auroras negras.

a altitudes más bajas, más próximas a tierra. Así, el intervalo de alturas de las regiones de aceleración mencionado antes viene dado en parte por estas dependencias de la estación y de qué sector horario del óvalo auroral se trata.

El sistema de doble arco, con sus estructuras asociadas de potencial eléctrico y corrientes, es un sistema dinámico que experimenta variaciones en muchas escalas de tiempo. Por ejemplo, la concentración electrónica aumentará en los arcos a causa de la ionización generada por el impacto de electrones sobre la atmósfera neutra y disminuirá donde la aurora negra a causa del escape de los electrones ionosféricos. A una altura de entre 100 y 200 kilómetros, los tiempos de reacción de esas variaciones van de los segundos a los minutos. Como la conductividad ionosférica es directamente proporcional a la densidad electrónica, el aumento y la disminución correspondientes de la conductividad alterarán la relación, sometida a la ley de Ohm, entre el campo eléctrico y la corriente. Tal variación con el tiempo tendrá lugar hasta en el caso de una fuente constante de corriente o flujo de electrones.

La evolución con el tiempo de la densidad electrónica de la ionosfera y del campo eléctrico para el sistema de doble arco se simula numéricamente asignando una distribución constante de corriente a la parte más alta de la ionosfera, con corrientes ascendentes sobre los arcos y descendente sobre la aurora negra. Las corrientes totales ascendentes y descendente poseen la misma magnitud; se equilibran.

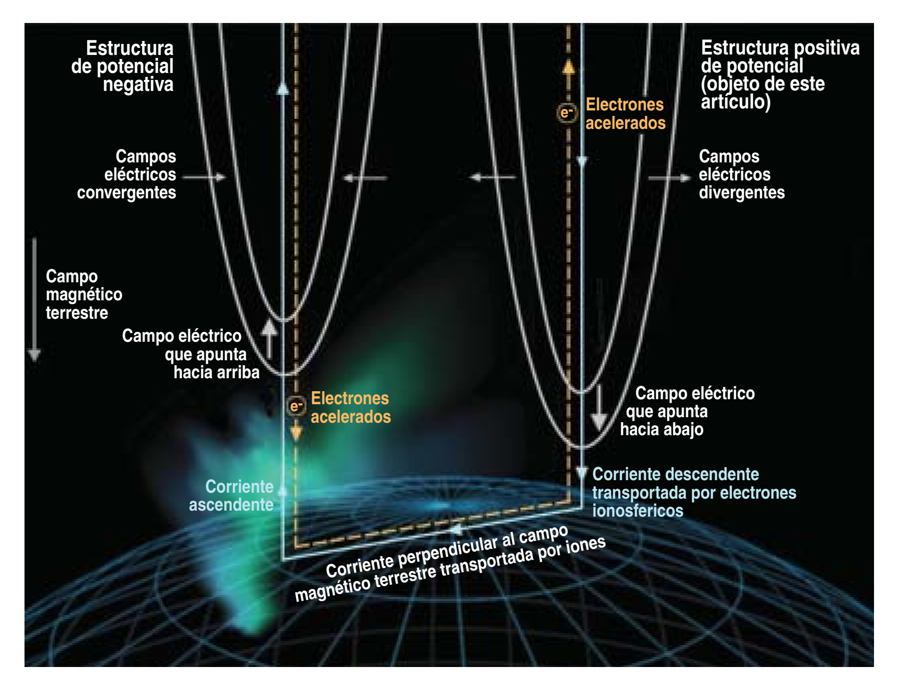


3. CORRIENTES (*flechas gruesas*), **campos eléctricos** (*flechas finas*) **y líneas de igual potencial eléctrico (las estructuras aceleradoras) anejas a la estructura de doble arco y aurora negra de la figura 1.**

Con el transcurrir el tiempo, ya hemos dicho que el reparto de la densidad electrónica a distintas alturas irá variando; entonces, como la corriente es constante, el campo eléctrico disminuirá donde la densidad electrónica y la conductividad aumenten (en los arcos) y aumentará donde la densidad electrónica disminuya (en la aurora negra). A los pocos segundos empezará a abrirse el agujero en la densidad electrónica, a una altura de entre 100 y 200 km.

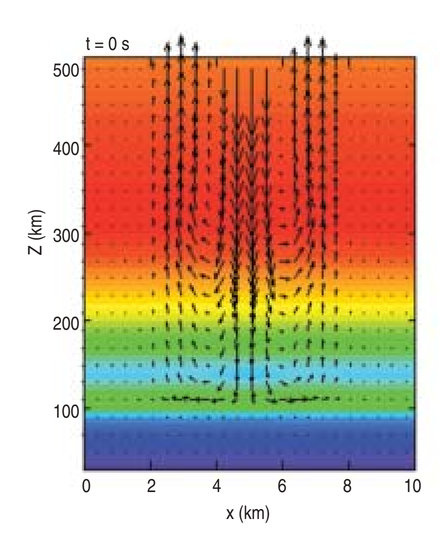
Pasados unos minutos, será ya muy perceptible; cubrirá varios cientos de kilómetros. A fin de impulsar la corriente constante a través de esta región de densidad reducida, el campo eléctrico ha de intensificarse apreciablemente.

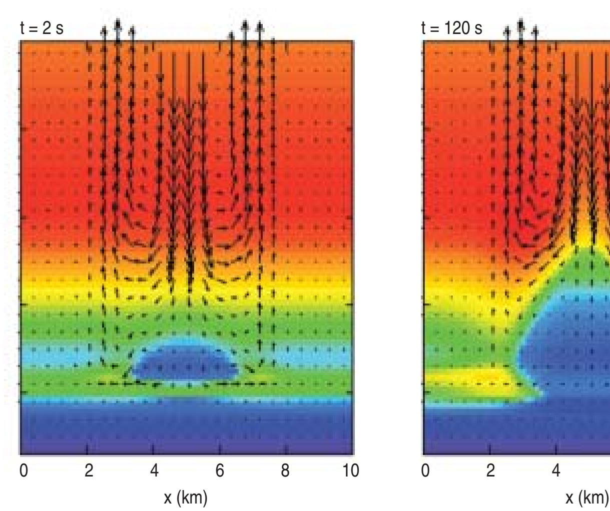
Una dificultad de las medidas con un solo satélite es que nada más proporcionan instantáneas de las condiciones locales a lo largo de la trayectoria del satélite. Estudiando las mediciones y cómo varían con las condiciones imperantes en muchas órbitas de satélite, es posible formarse una idea muy aproximada de la física del fenómeno incluso con las misiones de satélite único del pasado. Pero las propiedades dinámicas —así la escala temporal en que se desarrollan y mantienen las estructuras de aceleración—, que pueden aportar indicios sobre, por ejemplo, los mecanismos generadores, caen fuera del alcance de los datos de un solo satélite. Además, las variaciones observadas en los datos podrían ser espaciales o temporales, y las mediciones de un único satélite no suelen proporcionar una respuesta inequívoca sobre la naturaleza de las variaciones. Para en-



4. EL SISTEMA DE CORRIENTES común de las auroras boreales y de las negras. Los campos y corrientes de éstas se hallan invertidos con respecto a los de aquéllas. Este esquema básico muestra un corte en la dirección norte-sur; las estructuras se extienden cientos de kilómetros en la dirección este-oeste.







5. EVOLUCION TEMPORAL de la densidad electrónica ionosférica (n_e) y de las corrientes (*las flechas*) en función de la altura (*z*) y la distancia al polo (*x, perpendicular a la alineación del arco*), según una simulación numérica de la electrodinámica ionosférica asociada a la estructura de doble arco y aurora negra de la figura 1.

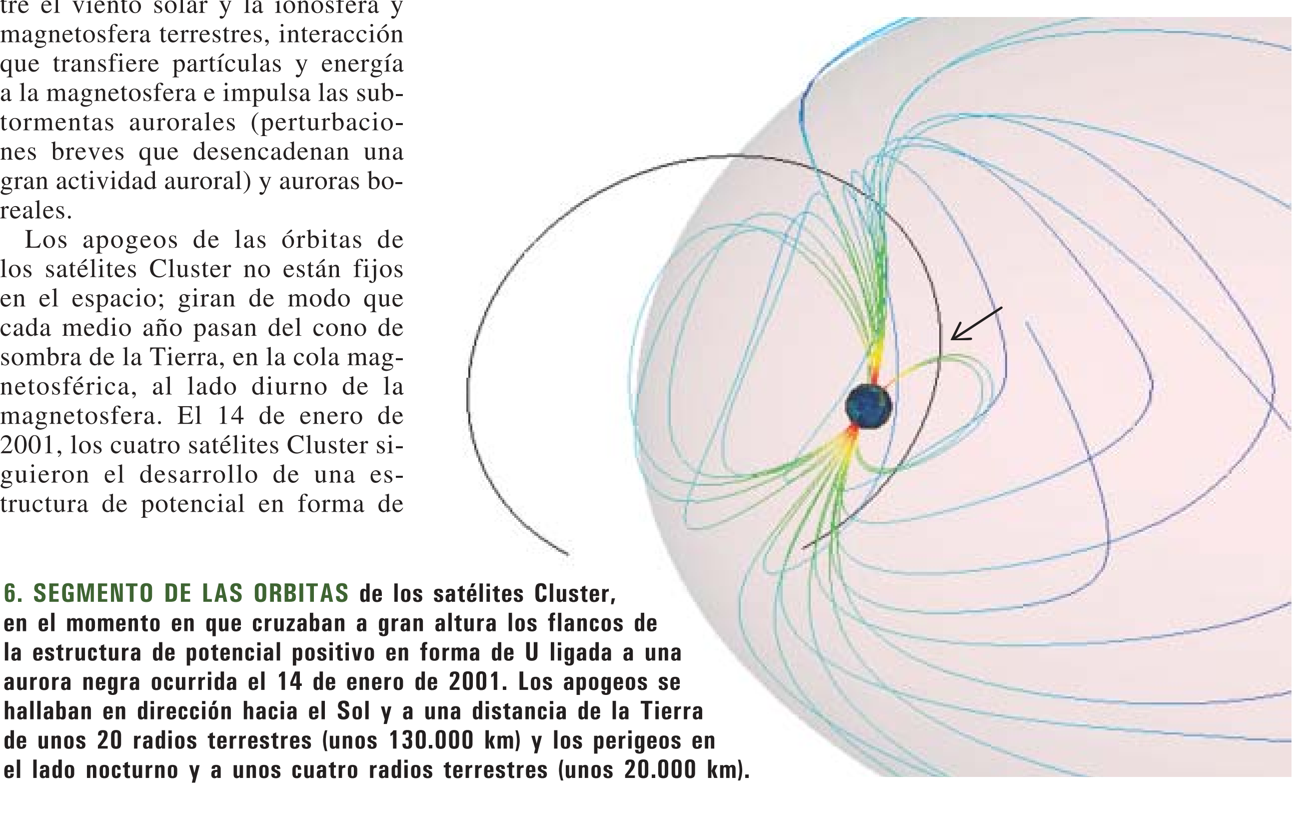
contrarla se requiere que mida un grupo de satélites.

Los satélites Cluster

Contamos con la oportunidad de superar esas dificultades inherentes a las mediciones tomadas por un solo satélite desde el verano de 2000, año en que se lanzaron los cuatro satélites idénticos Cluster. Describen órbitas muy elípticas alrededor de la Tierra. El primer objetivo de esta misión de la ESA (Agencia Espacial Europea) consistía en explorar la interacción entre el viento solar y la ionosfera y magnetosfera terrestres, interacción que transfiere partículas y energía a la magnetosfera e impulsa las subtormentas aurorales (perturbaciones breves que desencadenan una gran actividad auroral) y auroras boreales.

Los apogeos de las órbitas de los satélites Cluster no están fijos en el espacio; giran de modo que cada medio año pasan del cono de sombra de la Tierra, en la cola magnetosférica, al lado diurno de la magnetosfera. El 14 de enero de 2001, los cuatro satélites Cluster siguieron el desarrollo de una estructura de potencial en forma de U cargada positivamente mientras cruzaban sus flancos a gran altitud; cada uno siguió al anterior, más o menos por la misma órbita, con una separación de unos 100 segundos.

El potencial perpendicular al campo magnético terrestre que cruza la estructura, deducido del campo eléctrico medido, concordaba muy bien con el potencial de aceleración (o potencial paralelo al campo magnético) deducido de la energía característica de los haces de electrones ascendentes. Se trata de una prueba de la forma de U de la estructura de potencial. La concordancia entre el potencial perpendicular y el paralelo se mantuvo durante el paso de cada uno de los

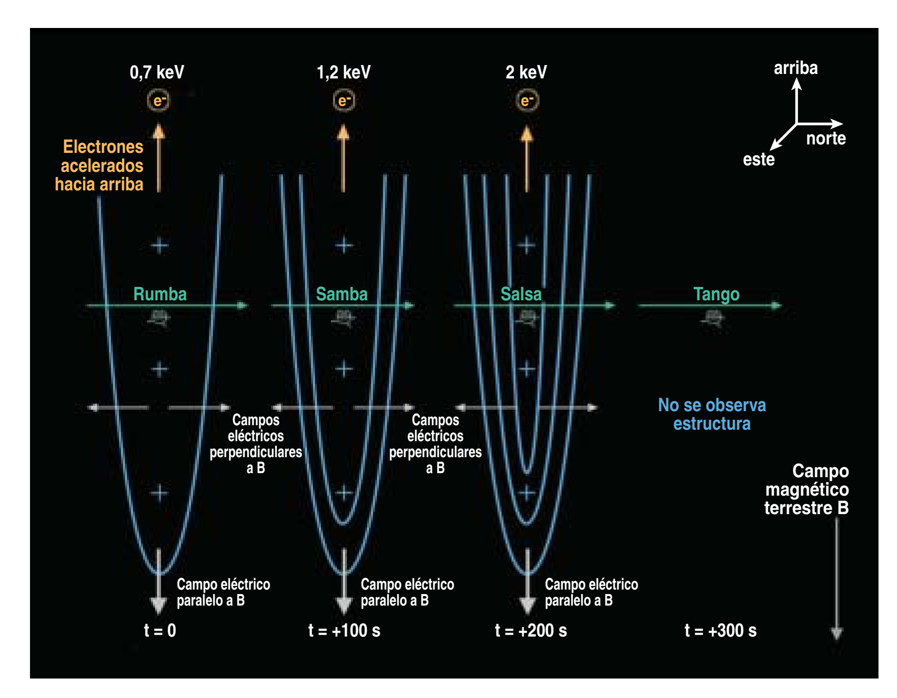


6. SEGMENTO DE LAS ORBITAS de los satélites Cluster, en el momento en que cruzaban a gran altura los flancos de la estructura de potencial positivo en forma de U ligada a una aurora negra ocurrida el 14 de enero de 2001. Los apogeos se hallaban en dirección hacia el Sol y a una distancia de la Tierra de unos 20 radios terrestres (unos 130.000 km) y los perigeos en el lado nocturno y a unos cuatro radios terrestres (unos 20.000 km).

GÖRAN MARKLUND

cuatro satélites. El potencial de aceleración de la estructura mostró un aumento constante, de 0,5 kV cuando pasó el satélite 1 (Rumba) a 1,1 kV cien segundos después (paso del satélite 3, Samba) y de ahí a un máximo de 2 kV a los 200 segundos (paso del satélite 2, Salsa), tras lo cual se produjo una brusca caída hasta menos de 0,8 kV a los 300 segundos (paso del satélite 4, Tango). Durante esta evolución de la estructura de aceleración, la corriente descendente asociada, transportada por los electrones, mantuvo una magnitud constante; circulaba, eso sí, por una vaina que se ensanchaba progresivamente. El aumento del potencial de aceleración parece encontrarse estrechamente ligado a la formación del agujero de densidad electrónica en la ionosfera y al número decreciente de transportadores de carga disponibles. Cuando el aprovisionamiento de electrones disminuye aún más en la ionosfera, bajo la estructura, la vaina de corriente tiene que ensancharse a fin de disponer de suficientes electrones para mantener la corriente constante. En el momento del paso del último satélite, la vaina de corriente era casi diez veces mayor que en el paso del primero; contaba así con transportadores de corriente de la ionosfera circundante, donde la densidad electrónica no se había anulado. En este instante, la estructura de aceleración había casi desaparecido, como indican la caída en la energía de aceleración de los electrones y la extinción del campo eléctrico.

El agujero de la densidad electrónica y la estructura de aceleración existente sobre ella representan una carga, variable con el tiempo, para la rama de corriente descendente del circuito de la corriente auroral. No cabe duda de que esa carga afecta también a la rama de corriente ascendente. Sin embargo, las propiedades de cada uno de los elementos del circuito de corriente tienen una influencia capital en la naturaleza de esa interacción; carecemos hoy de información para ofrecer algo más que conjeturas. Un elemento crucial del circuito auroral de corrientes es el generador que impulsa las corrientes aurorales, caracterizado por un campo eléctrico que apunta en la dirección opuesta a la de la corriente. La busca de episodios en los que se trasluzca de los datos de Cluster esa característica quizá descubra en un futuro cercano la posición y las propiedades del generador que alimenta ambas auroras, la boreal y la negra. Queda otro problema por resolver: se desconoce cómo diferentes mecanismos contribuyentes forman y mantienen las estructuras cuasiestáticas de aceleración anejas a las dos auroras. También acelera las partículas aurorales el campo eléctrico de una onda; a veces se impone esta aceleración a la aceleración cuasiestática estudiada arriba. Es probable que las contribuciones relativas, por una parte de los diferentes mecanismos a las estructuras cuasiestáticas de aceleración, por la otra de la aceleración cuasiestática y de la ondulatoria al movimiento de los electrones, varíen tanto con el tiempo como con la altura. Esto complica el cuadro general. Hay que aclarar estas y otras cuestiones antes de comprender del todo tanto la aurora boreal como la aurora negra que la acompaña.



7. LOS CUATRO VEHICULOS espaciales Cluster cruzaron a gran altura, en dirección al polo, los flancos de una estructura de potencial eléctrico en forma de U el 14 de enero de 2001. El potencial perpendicular (deducido del campo eléctrico) concuerda con el potencial de aceleración (deducido de los datos relativos a los electrones) para los cuatro satélites. La estructura de aceleración se intensifica entre el primer y el tercer cruce; tras éste, desaparece.

GÖRAN MARKLUND

Bibliografía complementaria

ON INTENSE DIVERGING ELECTRIC FIELDS ASSOCIATED WITH BLACK AURORA. G. T. Marklund, L. G. Blomberg, C.-G. Fälthammar y P.-A. Lindqvist, en *Geophysics Research Letters*, vol. 21, págs. 1859-1862; 1994.

ON LOW-ALTITUDE PARTICLE ACCELERATION AND INTENSE ELECTRIC FIELDS AND THEIR RELATIONSHIP TO BLACK AURORA. G. Marklund, T. Karlsson y J. Clemmons, en *Journal of Geophysics Research*, vol. 102, págs. 17.509-17.522; 1997.

HIGH SPATIAL AND TEMPORAL AURORAL IMAGING. Tesis doctoral de T. S. Trondsen. Universidad de Tromsö, 1998.

TEMPORAL EVOLUTION OF THE ELECTRIC FIELD ACCELERATING ELECTRONS AWAY FROM THE AURORAL IONOSPHERE. G. T. Marklund, N. Ivchenko, T. Karlsson, A. Fazakerley, M. Dunlop, P.-A. Lindqvist, S. Buchert, C. Owen, M. Taylor, A. Vaivards, P. Carter, M. André y A. Balogh, en *Nature*, vol. 414, págs. 724-727; 2001.

El Hombre de los Hielos

¿De dónde procedía el Hombre de los Hielos y qué hacía en ese paso a gran altura antes de morir? Estudios meticulosos, especialmente de los restos vegetales hallados en el cuerpo, modifican muchas de las interpretaciones avanzadas a partir del descubrimiento

James H. Dickson, Klaus Oeggl y Linda L. Handley

Un día claro de septiembre del año 1991, una pareja de excursionistas que recorría una cresta a gran altitud de los Alpes se encontró un cadáver que sobresalía de la nieve fundida. Tras regresar al refugio de montaña, avisaron a las autoridades. Estas pensaron que el cuerpo pertenecía a alguno de los alpinistas que todos los años desaparecen en las quebradas que cruzan los glaciares de la región. Pero cuando los restos se llevaron a la cercana ciudad de Innsbruck (Austria), Konrad Spindler, un arqueólogo de la universidad de esta localidad, determinó que el cuerpo pertenecía a un hombre prehistórico, muerto hacía varios miles de años. Spindler y otros científicos dedujeron que el cuerpo y todas sus pertenencias habían permanecido conservados en el hielo hasta que una precipitación de polvo procedente del Sahara, unida a un período cálido excepcional, causaron una fusión del hielo que dejó expuestas la cabeza y la espalda.

Hasta esa fecha, no se habían encontrado en Europa cuerpos bien conservados de ese período, el Neolítico. El Hombre de los Hielos es mucho más antiguo que los cuerpos de la Edad del Hierro hallados en las turberas de Dinamarca e incluso que las momias reales de los egipcios. Igual de sorprendente era la presencia de un conjunto completo de ropas y de una variedad de artefactos.

Con la emoción que produjo el hallazgo, tanto la prensa como los científicos vertieron muchas especulaciones sobre este hombre prehistórico. Spindler elaboró una hipótesis muy compleja sobre su muerte. Habría huido, decía, a las montañas para refugiarse después de que le hiriesen en una pelea en su pueblo de origen. Era otoño; se trataba de un pastor que buscó refugio en los pastos de alta montaña, adonde conducía sus rebaños en verano. Herido y extenuado, se quedó dormido y murió sobre la roca donde lo encontrarían cinco milenios más tarde. Según esta explicación, la magnífica conservación del cuerpo se debía a la rápida caída de nieve que lo protegió de los animales carroñeros, seguida de una rápida deshidratación a causa del frío.



JEFATURA DE LA GENDARMERIA REGIONAL DEL TIROL, AUSTRIA

1. EL HOMBRE DE LOS HIELOS fue descubierto en una hoya rocosa a gran altitud en los Alpes, en una zona de nieves y hielos perpetuos. La presión del hielo que le cubría provocó el desprendimiento de parte del cuero cabelludo. El cuerpo estaba boca abajo sobre una roca. Pese a lo que se creía en un principio, llegó allá flotando en alguno de los deshielos previos.

Como la singularidad del hallazgo no se reconoció de inmediato, se extrajo el cuerpo de una forma que destruyó mucha información arqueológica y deterioró el propio cadáver. Durante el verano de 1992 se realizó una excavación más rigurosa, con métodos arqueológicos, y se obtuvieron pruebas muy valiosas, con abundantes materiales orgánicos (semillas, hojas, madera, musgo...). Este material se añadía a los restos de plantas, musgos sobre todo, limpiados de la vestimenta durante el proceso de conservación. Ahora, tras una década de intensa investigación, efectuada tanto por nosotros como por otros científicos, de esos restos vegetales y de las muestras tomadas de los intestinos del Hombre de los Hielos, contamos con pruebas muy sólidas que modifican las interpretaciones esbozadas inicialmente y ponen en su lugar una historia mejor fundada.

¿Quién era?

Los excursionistas encontraron el cuerpo a una altitud de 3210 metros sobre el nivel del mar, en los Alpes de Ötztal. Por este motivo se le conoce popularmente con el apodo de Ötzi. Apenas a 92 metros de la frontera austroitaliana, la hoya, poco profunda, que protegía el cuerpo está cerca del paso Haslabjoch, entre el Schnalstal italiano (Valle de Senales) y el Ventertal en Austria (*véase el mapa del recuadro* "La ruta que debió de seguir el Hombre de los Hielos"). Yacía en una posición incómoda, boca abajo, un hombro sobre una roca, con el brazo izquierdo sobresaliendo por el lado derecho y la mano derecha atrapada bajo una piedra grande. Sus avíos y vestimenta, también congelados total o parcialmente, estaban dispersos alrededor de su cuerpo; algunas piezas se hallaban a varios metros. Las dataciones de los restos vegetales hallados junto al cuerpo y de las muestras del propio Ötzi y su vestimenta, efectuadas con métodos de radiocarbono por tres laboratorios diferentes, confirmaron que tenía una antigüedad de 5300 años.

No costó demasiado descubrir unos cuantos detalles más acerca de Ötzi. Fue un hombre bajo, de 159 centímetros de estatura, como muchos que viven en Schnalstal hoy en día. El estudio de sus huesos mostró que tenía 46 años, una edad avanzada para su época. Los análisis de ADN situaban su origen en Europa norte y central, lo que podría parecer obvio, pero lo diferencia de la población de origen mediterráneo, cuyas tierras no se hallan muy lejos, al sur.





Tenía una anomalía congénita harto rara: le faltaba la duodécima costilla. Además, las costillas séptima y octava del lado derecho se rompieron y sanaron en algún momento de su vida. Según Peter Vanezis, de la Universidad de Glasgow, su tórax derecho estaba deformado y había dos posibles fracturas en las costillas tercera y cuarta. Pero, al igual que la fractura del brazo izquierdo, esas lesiones se produjeron después de su muerte. Se trata de uno de los numerosos indicios que arrojan dudas sobre las hipótesis iniciales. Otro es el descubrimiento de que el desprendimiento de una parte del cuero cabelludo fue causado por la presión y no por un golpe o por la descomposición.

Dejando a un lado las cuestiones sin resolver respecto a la muerte de Ötzi y si ésta fue violenta o no, hay pruebas de que no tenía un buen estado de salud cuando murió. Aunque la mayor parte de su epidermis, pelo y uñas habían desaparecido, probablemente descompuestas como resultado de la exposición al agua durante deshielos ocasionales, sus restos ofrecieron mucha información. El examen de la única uña de la mano hallada mostraba tres "líneas de Beau": aparecen cuando existe una interrupción en el crecimiento normal de las uñas. Indican que padeció una enfermedad grave tres veces en los últimos seis meses de su vida; el último episodio, alrededor de dos meses antes de su muerte, fue el más intenso de todos y duró cerca de dos semanas. Horst Aspöck, de la Universidad de Viena, descubrió que sufría una infección intestinal, causada por un nemátodo parásito (*Trichuris trichiura*), que le produjo una diarrea debilitante e incluso disentería, aunque no conocemos la gravedad de la infección.

En la capa de piel situada bajo la perdida epidermis se ven numerosos tatuajes de formas simples, realizados con polvo de carbón. Sin duda, estos símbolos no eran decorativos; probablemente tenían fines terapéuticos. Algunos se encontraban muy cerca de los puntos de la acupuntura china, en partes donde Ötzi pudo haber sufrido artritis (en la zona lumbar, rodilla y tobillo derechos). Esta coincidencia ha conducido a que se piense en tratamientos de acupuntura. Sin embargo, según Vanezis y Franco Tagliaro, de la Universidad de Roma, las radiografías han mostrado muy pocas señales, si alguna, de artritis.

El dedo meñique del pie izquierdo evidenciaba síntomas de congelación. Los dientes estaban muy desgastados, un reflejo de la edad y alimentación de Ötzi. Se encontraron los restos de dos pulgas en su vestimenta. No se encontró ningún piojo, pero como la epidermis se había descompuesto, si hubiera tenido alguno se habría perdido.

¿Cómo eran sus pertrechos?

Volviendo a la vestimenta y a los utensilios de Ötzi, conocemos mejor no sólo a Ötzi, sino también la comunidad con la que vivió. Los útiles son un testimonio del profundo conocimiento que tenía su pueblo de las rocas, hongos, plantas y animales del entorno inmediato. Y también podemos saber que obtenían recursos —sílex, mineral de cobre— de lugares más lejanos. Gracias a estos conocimientos, Ötzi iba muy bien equipado; cada objeto estaba confeccionado con el material más apropiado para su uso.

Le abrigaban perfectamente tres capas de ropa: calzas, taparrabo y una chaqueta confeccionados con piel de ciervo y cabra; portaba una capa de hierba y estopa (fibras largas y resistentes extraídas de la corteza del tilo). El gorro era de piel de oso. El calzado tenía una capa aislante de hierba; la suela era de piel de oso y la parte superior de piel de cabra.

Llevaba un hacha de cobre y un cuchillo de sílex procedente del Lago de Garda, que se encuentra 150 kilómetros al sur. El mango del cuchillo era de madera de fresno, un material que todavía se usa porque no se astilla fácilmente. Su arco, sin rematar, era de tejo, la mejor madera posible por su gran resistencia a la tensión (los famosos arcos con los que los arqueros ingleses derrotarían a los franceses en Azincourt 4000 años más tarde serían también de tejo). En el carcaj de piel había catorce flechas, pero sólo dos de ellas —ambas, eso sí, rotas— tenían plumas y puntas. Trece de las varas de flechas eran de morrionera (*Viburnum lantana*), un arbusto de tallo largo, recto y rígido del diámetro adecuado; una estaba hecha de morrionera y de cornejo (*Cornus sanguinea*).

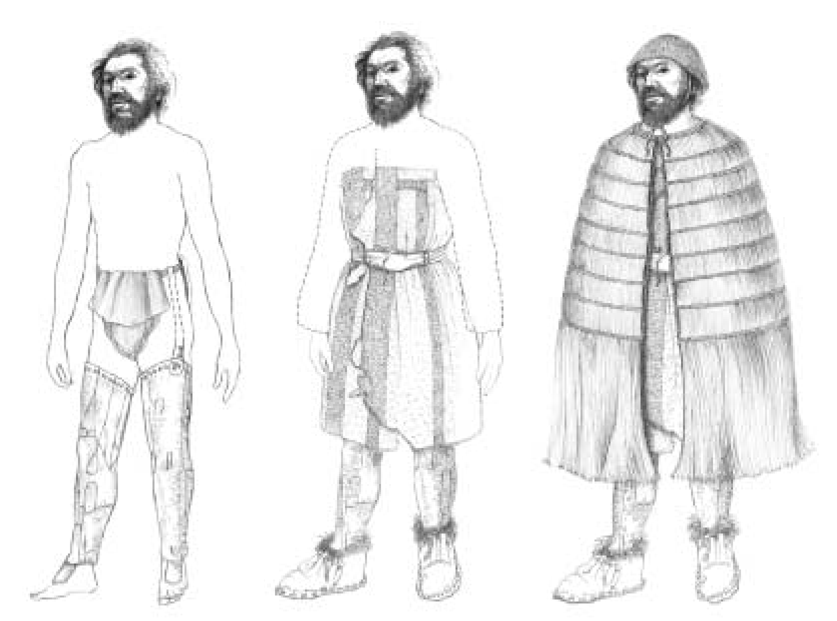
Un bolso a modo de cinturón contenía yesca, de un hongo polípor o que crece en los árboles, el hongo yesquero, y fragmentos de pirita y sílex, para sacar chispas. También se halló una pequeña herramienta para afilar el sílex. Llevaba ensartados en una correa de piel dos pedazos perforados del hongo polípor o del abedul, que cuenta con algunos compuestos farmacológicos (triterpenos); quizá se usaban con fines medicinales. Además, se encontraron fragmentos de una red, el armazón de una mochila y dos recipientes elaborados con corteza de abedul; uno de ellos contenía carbón y hojas de arce real (*Acer platanoides*): quizás éstas envolvieran brasas.

MUSEO ARQUEOLOGICO DEL SUR DEL TIROL, BOLZANO (www.iceman.it)

Resumen/ Una nueva interpretación del hombre prehistórico

Los análisis recientes indican que el Hombre de los Hielos:

- Quizá viviese cerca de donde se encuentra hoy el castillo de Juval, en el sur del Tirol (Italia).
- Su alimentación era variada; incluía escanda, otras plantas y carne.
- Su edad era de 46 años y no tenía un buen estado de salud.
- Falleció en primavera.
- Pudo haber muerto de un flechazo en la espalda.
- No murió en la roca donde fue hallado, sino que flotó hasta ese lugar en un episodio de deshielo.



2. EL HOMBRE DE LOS HIELOS se protegía con una triple indumentaria de pieles, hierbas y fibras de corteza. Estas reconstrucciones han sido realizadas por los arqueólogos del Museo Central Romanogermánico de Maguncia (Alemania), donde se han restaurado los pertrechos y la ropa del Hombre de los Hielos.

JULIA RIBBECK, TOMADO DE "DIE GLETSCHERMUMIE," RGZM

¿De dónde procedía?

Los valles discurren en esta zona de los Alpes de norte a sur, entre elevadas cadenas montañosas. Sólo hay que saber, pues, si Ötzi vino del norte o del sur; del este o del oeste, no pudo. Las pruebas botánicas apuntan al sur. Se descubrió hace mucho un yacimiento neolítico en Juval, castillo medieval en el extremo meridional del Schnalstal, a 2000 metros menos de altitud pero a tan sólo una distancia de 15 kilómetros, en línea recta, de donde apareció el Hombre de los Hielos. Las excavaciones arqueológicas del yacimiento neolítico no son recientes; no existen dataciones de carbono 14. Pero Juval es el lugar más cercano a la hoya de Ötzi donde todavía medran plantas y musgos relacionados con éste. No tenemos ninguna razón para pensar que tales organismos no se daban en época prehistórica; quizás Ötzi vivía allá.

Cuando se efectuaron los trabajos de conservación de la vestimenta, se recogieron muchos restos vegetales, con grandes cantidades del musgo forestal *Neckera complanata*. Este musgo y otros que llevaba crecen al norte y al sur del lugar del hallazgo, pero las fuentes meridionales se hallan más cercanas. *N. complanata* abunda en los alrededores de Juval. Wolgang Hofbauer, que trabaja en el Instituto Fraunhofer de Física de la Construcción, en Valley (Baviera), ha descubierto que está presente, en cantidades moderadas, en Vernagt, a tan sólo cinco kilómetros de la hoya de Ötzi, a 1450 metros menos de altitud. Más recientemente, Alexandra Schmidl, del Instituto Botánico de la Universidad de Innsbruck, descubrió pequeños fragmentos de hojas del musgo *Anomodon viticulosus* en muestras tomadas del estómago del Hombre de los Hielos. Este musgo forestal crece junto a *N. complanata* en Schnalstal.

Si Juval no fue su lugar de origen, hay pruebas de ocupación neolítica en el cercano valle de Vinschgau (Valle de Venosta) y el valle del río Adigio. Por el contrario, hacia el norte, los yacimientos neolíticos conocidos más próximos caen ya a muchas decenas de kilómetros, y no tenemos indicios de asentamientos neolíticos en el Ventertal o en el Ötztal. Su hogar, pues, se hallaba quizás a menos altitud, en Schnalstal o en Vinschgau; en tal caso, Ötzi vivió en una región de inviernos suaves y cortos, con pocas nevadas, especialmente si el clima era por entonces un poco más cálido.

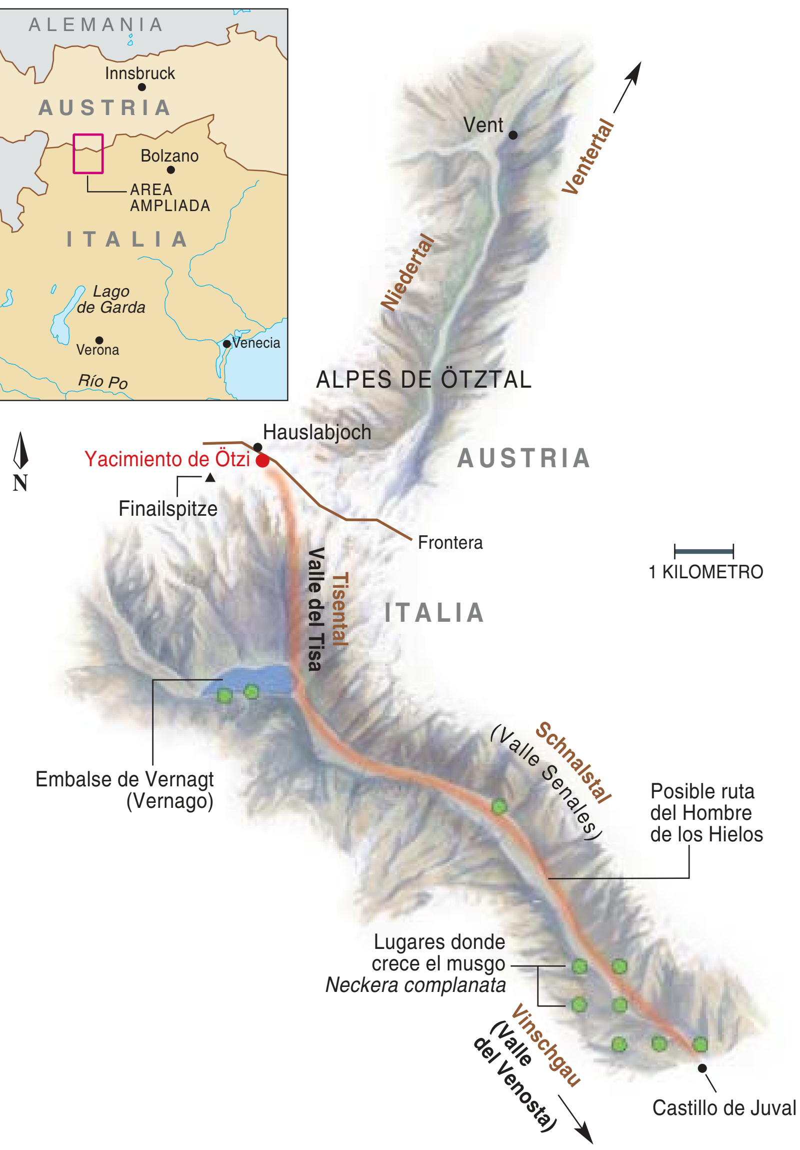
Los análisis de la composición isotópica del esmalte dental, efectuados por Wolfgang Müller, de la Universidad Nacional Australiana, indican que Ötzi se crió en una región y pasó las últimas décadas de su vida en otra. A partir del estudio de los isótopos estables y de los elementos presentes como trazas, Jurian Hoogewerff, del Instituto de Investigación de los Alimentos en Norwich, sostiene que Ötzi vivió sus últimos años en Ventertal o en valles cercanos más al norte. Si pudiera corroborarse, constituiría un hallazgo apasionante.

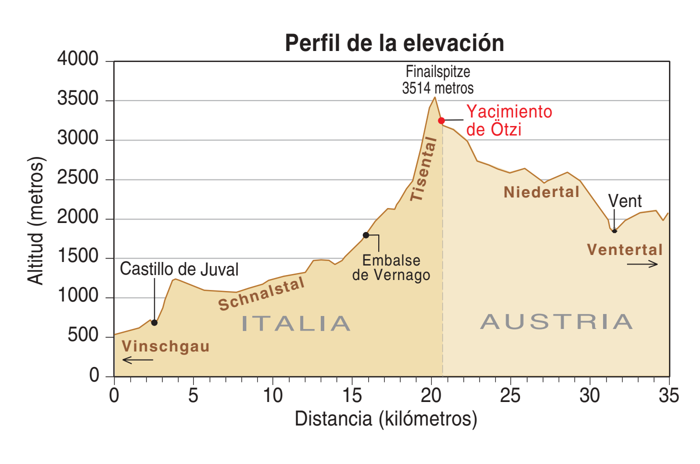
Los autores

JIM DICKSON, KLAUS OEGGL y LINDA HANDLEY comparten el interés por las plantas que el Hombre de los Hielos del Tirol pudo haber utilizado a lo largo de su vida. Dickson es profesor de arqueobotánica y sistemática vegetal en la Universidad de Glasgow y ha recibido la medalla Neill de la Sociedad Real de Edimburgo. Ha escrito más de 150 artículos y cinco libros. Oeggl es profesor de botánica de la Universidad de Innsbruck, experto en arqueobotánica y coeditor del libro *The Iceman and His Natural Environment* (Springer-Verlag, 2000). Handley, ecofisióloga del Instituto Escocés de Investigaciones sobre las Cosechas, en Invergowrie, está especializada en el estudio de isótopos estables de carbono y nitrógeno en plantas y suelos.

¿Qué comía?

Los estudios que se están efectuando en los restos vegetales de las muestras tomadas del tracto digestivo de Ötzi nos proporcionan información directa de sus últimas comidas. Uno de los autores de este artículo (Oeggl) ha detectado salvado de escanda (*Triticum monococcum*), un trigo primitivo tan fino que debió de molerse como harina para elaborar pan y no se consumió en forma de gachas. Residuos microscópicos de plantas, que hasta la fecha no se han podido identificar, prueban que se alimentaba también de otras plantas. Franco Rollo y su equipo de la Universidad de Camerino (Italia) han reconocido, en los análisis de ADN de los residuos de comida encontrados en los in-





LA RUTA QUE DEBIO DE SEGUIR EL HOMBRE DE LOS HIELOS

La zona donde se encontró el Hombre de los Hielos (*círculo rojo*) se halla en la frontera entre Austria e Italia. En un primer momento se pensó que estaba en Austria, y el cuerpo fue llevado a Innsbruck. Más tarde, las autoridades determinaron que el yacimiento pertenecía a territorio italiano; por este motivo, el Hombre de los Hielos se conserva ahora en un museo especialmente dedicado a él en Bolzano. A partir de los restos vegetales asociados con el cuerpo, los autores creen que el último itinerario (*línea roja*) seguido por el Hombre de los Hielos debió de partir de los alrededores del castillo de Juval para internarse en el Schnalstal y a continuación emprender la empinada ascensión al Tisental (*véase el perfil de arriba*). Dickson y sus colaboradores han rastreado la región en busca de las 80 especies de musgos y hepáticas halladas en el cuerpo del Hombre de los Hielos y extraídas de la arena y grava del fondo de la depresión. Sólo se dan en los alrededores del lugar del hallazgo unas 20. El musgo que tenía en grandes cantidades en su vestimenta es de la especie *Neckera complanata* (*los círculos verdes muestran dónde crece en la actualidad*). El área de mayor concentración de este musgo aloja además muchas de las otras plantas halladas con el Hombre de los Hielos; se encuentra al sur del yacimiento, en el castillo de Juval, donde también existen pruebas arqueológicas de asentamientos prehistóricos. Esa zona podría haber sido su hogar.

ROB WOOD *Wood Ronsaville Harlin, Inc. (mapa topográfico)*; MICHAEL SHAND *Universidad de Glasgow (perfil de altitudes)*

testinos del Hombre de los Hielos, la presencia de ciervo e íbice o cabra alpina. Además, se descubrieron astillas de huesos de cuello de íbice cerca del cuerpo de Ötzi. También se halló alrededor del cuerpo una endrina. Las endrinas, pequeñas y amargas, pudieron entrar en su dieta.

De su tracto digestivo se extrajeron varios tipos de musgo. Apenas si hay indicios de que los humanos consumieran musgos, y menos como componente principal de la alimentación. Pero hace más de 5000 años no se disponía de materiales para envolver, embalar, rellenar o secar. Los musgos eran muy apropiados para estos usos, como han demostrado numerosos descubrimientos arqueológicos por toda Europa. Su presencia habitual en pozas sépticas de vikingos y de época medieval revela una aplicación similar al papel higiénico. Que las provisiones de Ötzi se envolvieran en musgo nos explicaría de forma sencilla la presencia de las hojas y fragmentos de hojas de *N. complanata* hallados en las muestras intestinales; Ötzi podría haberlos consumido de forma accidental.

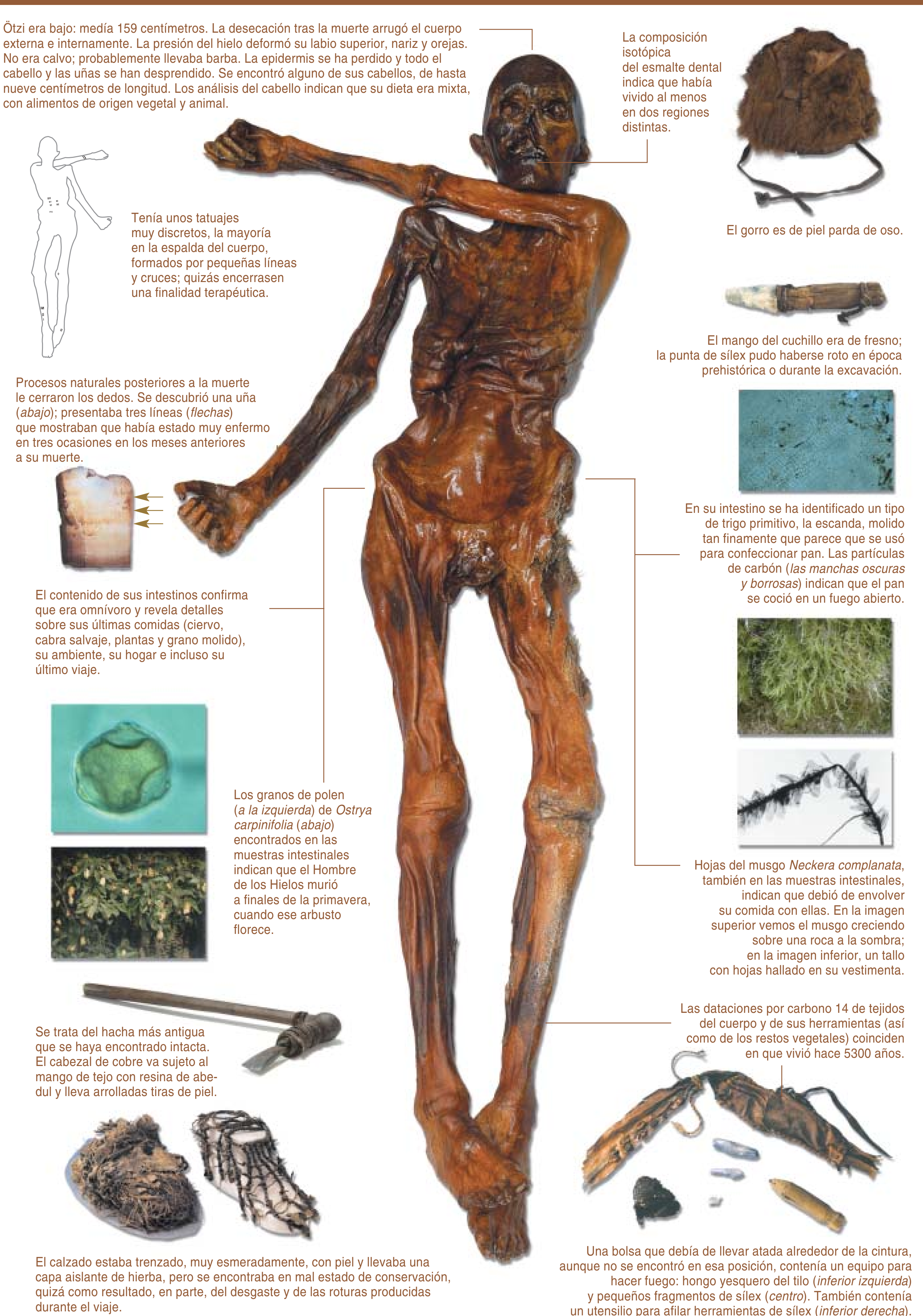
Analizando la abundancia relativa de los isótopos estables de carbono y nitrógeno (carbono 13 y nitrógeno 15) en los restos arqueológicos de hueso y de pelo obtenemos claves sobre su dieta. El nitrógeno 15 informa de la proporción de proteínas animales o vegetales que consumía un individuo. El carbono 13 muestra el tipo de plantas que consumía y si los alimentos de origen terrestre o marino formaban una parte fundamental de su dieta.

Los datos isotópicos concuerdan con las demás pruebas que indican que Ötzi se alimentaba de productos vegetales y animales. Alrededor del 30 por ciento del nitrógeno que tomaba con los alimentos procedía de proteínas de origen animal, el resto de las plantas. Este valor coincide con los de las tribus de cazadores-recolectores actuales. Los datos también avalan que no ingería alimentos de origen marino. Lo que resulta comprensible, dada la gran distancia a la que se encontraba del mar.

¿Qué estaba haciendo allí?

Incluso hoy los pastores, siguiendo una antigua costumbre, llevan en junio sus rebaños desde Schnalstal a los pastos más altos de Ötztal y bajan de allí en septiembre. El cuerpo fue hallado cerca de una de esas

LO QUE NOS ENSEÑAN EL HOMBRE DE LOS HIELOS Y SUS PERTENENCIAS



Ötzi era bajo: medía 159 centímetros. La desecación tras la muerte arrugó el cuerpo externa e internamente. La presión del hielo deformó su labio superior, nariz y orejas. No era calvo; probablemente llevaba barba. La epidermis se ha perdido y todo el cabello y las uñas se han desprendido. Se encontró alguno de sus cabellos, de hasta nueve centímetros de longitud. Los análisis del cabello indican que su dieta era mixta, con alimentos de origen vegetal y animal.

La composición isotópica del esmalte dental indica que había vivido al menos en dos regiones distintas.

El gorro es de piel parda de oso.

Tenía unos tatuajes muy discretos, la mayoría en la espalda del cuerpo, formados por pequeñas líneas y cruces; quizás encerrasen una finalidad terapéutica.

El mango del cuchillo era de fresno; la punta de sílex pudo haberse roto en época prehistórica o durante la excavación.

Procesos naturales posteriores a la muerte le cerraron los dedos. Se descubrió una uña (*abajo*); presentaba tres líneas (*flechas*) que mostraban que había estado muy enfermo en tres ocasiones en los meses anteriores a su muerte.

En su intestino se ha identificado un tipo de trigo primitivo, la escanda, molido tan finamente que parece que se usó para confeccionar pan. Las partículas de carbón (*las manchas oscuras y borrosas*) indican que el pan se coció en un fuego abierto.

El contenido de sus intestinos confirma que era omnívoro y revela detalles sobre sus últimas comidas (ciervo, cabra salvaje, plantas y grano molido), su ambiente, su hogar e incluso su último viaje.

Los granos de polen (*a la izquierda*) de *Ostrya carpinifolia* (*abajo*) encontrados en las muestras intestinales indican que el Hombre de los Hielos murió a finales de la primavera, cuando ese arbusto florece.

Hojas del musgo *Neckera complanata*, también en las muestras intestinales, indican que debió de envolver su comida con ellas. En la imagen superior vemos el musgo creciendo sobre una roca a la sombra; en la imagen inferior, un tallo con hojas hallado en su vestimenta.

Las dataciones por carbono 14 de tejidos del cuerpo y de sus herramientas (así como de los restos vegetales) coinciden en que vivió hace 5300 años.

Se trata del hacha más antigua que se haya encontrado intacta. El cabezal de cobre va sujeto al mango de tejo con resina de abedul y lleva arrolladas tiras de piel.

El calzado estaba trenzado, muy esmeradamente, con piel y llevaba una capa aislante de hierba, pero se encontraba en mal estado de conservación, quizá como resultado, en parte, del desgaste y de las roturas producidas durante el viaje.

Una bolsa que debía de llevar atada alrededor de la cintura, aunque no se encontró en esa posición, contenía un equipo para hacer fuego: hongo yesquero del tilo (*inferior izquierda*) y pequeños fragmentos de sílex (*centro*). También contenía un utensilio para afilar herramientas de sílex (*inferior derecha*).

MUSEO ARQUEOLOGICO DEL SUR DEL TIROL, ITALIA (www.iceman.it) (*Hombre de los Hielos, hacha, gorro de piel de oso*); CHRISTIN BEECK, TOMADO DE M. EGG ET AL., "DIE GLETSCHERMUMIE VOM ENDE DER STEINZEIT AUS DEN ÖTZTALER ALPEN," MUSEO CENTRAL ROMANOGERMANICO DE MAGUNCIA (RGZM) (*zapatos, bolsillo, cuchillo*); TOMADO DE "DIE GLETSCHERMUMIE," RGZM (*silueta del Hombre de los Hielos*); TOMADO DE K. SPINDLER ET AL. (coordinadores), DER MANN IM EIS. NEUE FUNDE UND ERGEBNISSE VOL. 2 (SPRINGER, VIENA-NUEVA YORK, 1995) (*uña*); KLAUS OEGGL (*grano de polen, escanda*); JAMES H. DICKSON (Ostrya carpinifolia, *musgo, tallo con hojas*)



3. EN LA ZONA ROCOSA y helada donde se halló al Hombre de los Hielos se ha erigido un monumento conmemorativo. Las tres personas se encuentran justo en el lugar donde yacía. Normalmente, la nieve y el hielo no llegan a fundirse lo suficiente, como cuando se tomó esta fotografía en verano de 2000, para que aparezcan las rocas y la grava que hay en el fondo de la depresión rocosa.

rutas tradicionales; por eso las primeras hipótesis propusieron que se trataba de un pastor. Pero ningún elemento de su vestimenta, ni de su equipo indica que desarrollase ese oficio. No se encontró ningún resto de lana, ningún perro pastor a sus pies, ningún cayado en sus manos. Se presentan como pruebas de la hipótesis del pastor la capa de hierba y estopa, que tiene análogos actuales en las prendas de los pastores de los Balcanes. Pero por sí sólo esto no es concluyente; que sepamos, se trataría de la indumentaria habitual de un viajero en aquella época.

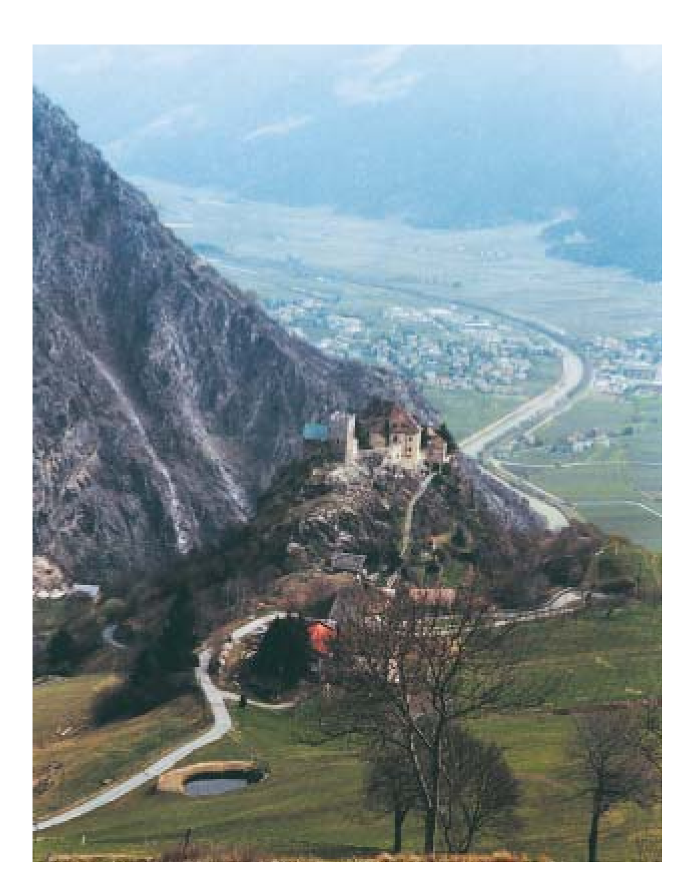
Los análisis de los pocos cabellos recuperados de Ötzi revelaron altos índices de arsénico y cobre. La explicación publicada es que habría participado en la fundición del cobre. Pero Geoffrey Grime, de la Universidad de Surrey, considera que esos niveles excepcionalmente altos pueden ser el resultado de la fijación bacteriana de metales después de la muerte de Ötzi; el cobre no estaba dentro del cabello, sino en su superficie. Más datos a favor de la posibilidad de que el cobre se adhiriese tras la muerte proceden de la presencia del musgo *Mielichhoferia elongata*, o musgo del cobre, que crece preferentemente en rocas que contienen ese mineral. Uno de nosotros (Dickson) ha observado su presencia cerca del yacimiento; Ronald D. Portley lo corroboró.

Según afirmaba otra hipótesis nos hallaríamos ante un cazador de íbices; el arco y el carcaj de flechas podrían respaldar esta explicación. No obstante, si hubiese estado cazando en el momento de su muerte, ¿por qué su arco no estaba rematado y le faltaba la cuerda? ¿Por qué, excepto dos, las flechas carecían de puntas y flechas, y esas dos estaban rotas?

Otras hipótesis que se adelantaron sobre el oficio de Ötzi: que se trataba de un forajido, de un comerciante de sílex, de un chamán o de un guerrero. Ninguna tiene fundamento, a menos que los chamanes diesen a los fragmentos de hongo políporo que transportaba un uso medicinal o espiritual.

¿Cómo murió?

En julio de 2001, Paul Gostner y Eduard Egarter Vigl, del Hospital Regional de Bolzano, anunciaron que las radiografías revelaban la presencia de una punta de flecha en la espalda de Ötzi, por debajo del hombro izquierdo. Basándose en este descubrimiento, se habló de una muerte violenta. Gostner y Egarter Vigl afirman: “En la actualidad está probado que Ötzi no falleció de muerte natural, ni debido únicamente al agotamiento o a la congelación”. Aunque existen reconstrucciones tridimensionales del objeto, de 27 milímetros de longitud y 18 milímetros de anchura, todavía no se ha aceptado la solicitud realizada por Vanezis y Tagliaro de que se lo extraiga para comprobar de




JAMES H. DICKSON

4. EL CASTILLO DE JUVAL en Schnalstal, a menor altitud que donde se produjo el hallazgo, es el lugar más cercano a éste donde se encuentran muchas de las plantas de baja altura que aparecieron junto al Hombre de los Hielos.

forma concluyente que se trata de una punta de flecha. Además, habría que sacarla de forma que se pudiese observar si causó lesiones letales.

Pero la punta de flecha no tuvo por qué causar la muerte. Muchos individuos siguen viviendo después de que objetos extraños, una bala, por ejemplo, hayan entrado en su cuerpo. Un ejemplo arqueológico muy destacable es la punta de lanza de estilo Cascade hallada en el coxal derecho del famoso hombre de Kennewick, en Estados Unidos, que había sobrevivido tanto como para que el hueso creciese alrededor.

¿En qué época del año murió?

Los primeros informes situaban la muerte en otoño. Se basaban en la presencia cerca del cuerpo de la endrina, fruto que madura a finales del verano, y en los pequeños fragmentos de grano en las ropas de Ötzi, que, según cabría presumir, se depositaron ahí durante la trilla. Pero ahora tenemos numerosas pruebas botánicas que indican que murió a finales de primavera o principios del verano. Los análisis que Oeggl ha efectuado en un pequeño fragmento de residuo de comida extraído del colon de Ötzi han revelado la presencia de polen de un arbusto similar al carpe (*Ostrya carpinifolia*). Sorprende que gran parte del polen haya retenido su estructura celular, pues suele descomponerse enseguida. Esto significa que ingirió poco antes de su fallecimiento polen transportado por el aire o bebió agua que contenía pólenes muy recientes. *Ostrya carpinifolia*, que en la actualidad medra, hasta los 1200 metros de altitud, en Schnalstal, florece entre finales de primavera y principios de verano.

Puede que Ötzi llevase endrinas secas, como pasas; la desecación podría haberse realizado mucho antes de su viaje. Los fragmentos de grano se conservan de forma indefinida; pudo haberlos transportado, sin advertirlo, en sus ropas durante mucho tiempo.

Lo que sabemos

Transcurrido un decenio largo desde el descubrimiento del más antiguo y mejor preservado cuerpo humano de la Prehistoria, las interpretaciones sobre quién fue aquel hombre y cómo llegó a morir en esa depresión rocosa a gran altura de los Alpes han cambiado de forma considerable. Y ahora somos conscientes de la necesidad de efectuar muchos nuevos análisis, muy minuciosos. El estudio de los restos vegetales (el polen, semillas, musgos y hongos hallados en el interior y en el exterior del cuerpo) ha esclarecido un número sorprendente de enigmas que envolvían a Ötzi. Sabemos que era omnívoro, que disfrutaba de un conocimiento profundo de su entorno, que procedía de más al sur; conocemos su edad y su estado de salud y la estación del año en que murió. Sabemos también algo de su medio ambiente. Quizás una de las reinterpretaciones más sorprendentes sea que ahora pensemos que no murió sobre la roca donde lo encontraron. Llegó allá flotando durante alguno de los deshielos ocasionales de los últimos 5000 años. La posición del cuerpo, con el brazo izquierdo asomando rígidamente por el lado derecho y la mano derecha atrapada debajo de una piedra, y la pérdida de la epidermis nos llevan a esta conclusión, reforzada por la presencia de algunas de sus pertenencias a varios metros de distancia del cuerpo, como si, flotando, se hubiesen apartado de éste.

Pero no sabemos, y quizá no lo sepamos nunca, por qué Ötzi se encontraba a esa altura en los Alpes. Y quizá nunca comprenderemos exactamente la forma en que pereció. Realizar una autopsia podría ser demasiado destructivo. En ausencia de este tipo de pruebas, no podemos excluir del todo la posibilidad de que muriese en otro lugar y lo llevaran a la depresión donde fue hallado por los excursionistas 5000 años más tarde.



MUSEO ARQUEOLOGICO DEL SUR DEL TIROL, ITALIA (www.iceman.it)

5. EL HOMBRE DE LOS HIELOS se encuentra en la actualidad en una cámara especialmente diseñada del Museo Arqueológico del Sur del Tirol (Bolzano), que lo mantiene a 6 grados bajo cero y al 99 % de humedad.

Bibliografía complementaria

THE OMNIVOROUS TYROLEAN ICEMAN: COLON CONTENTS (MEAT, CEREALS, POLLEN, MOSS AND WHIPWORM) AND STABLE ISOTOPE ANALYSES. James H. Dickson et al., en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Series B, vol. 355, págs. 1843-1849; 29 de diciembre, 2000.

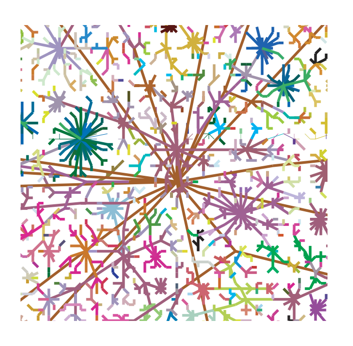
INSIGHT: REPORT OF RADIOLOGICAL-FORENSIC FINDINGS ON THE ICEMAN. Paul Gostner y Eduard Egarter Vigl, en *Journal of Archaeological Science*, vol. 29, n.º 3, págs. 323-326; marzo 2002.

ÖTZI'S LAST MEALS: DNA ANALYSIS OF THE INTESTINAL CONTENT OF THE NEOLITHIC GLACIER MUMMY FROM THE ALPS. Franco Rollo et al., en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 99, n.º 20, págs. 12.594-12.599; 1 de octubre, 2002.

Redes sin escala

Existen sistemas complejos de apariencia dispar que poseen, subyacentes, arquitecturas organizadas por unos mismos principios. Tal hecho reviste importantes consecuencias en multitud de aplicaciones, desde el desarrollo de fármacos hasta la seguridad de Internet

Albert-László Barabási y Eric Bonabeau



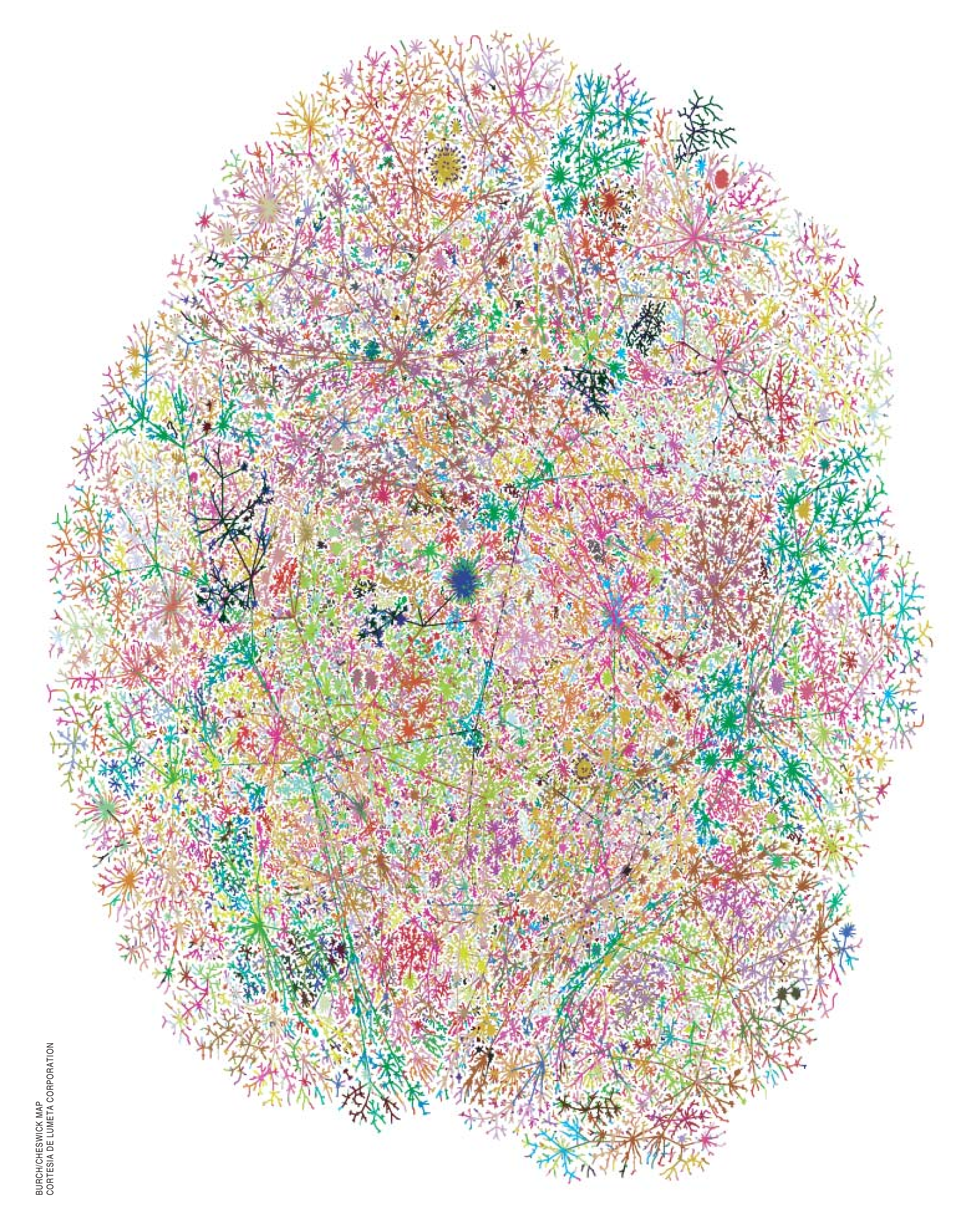
1. INTERNET constituye una red sin escala, en la que algunos sitios parecen tener un número ilimitado de vínculos con otros. En este mapa, construido el 6 de febrero de 2003, se rastrean las rutas más cortas de un sitio de prueba de la Red hasta, aproximadamente, otros 100.000. Mediante colores similares se han representado direcciones parecidas de la Red.

Las redes son ubicuas. El cerebro es una red de células nerviosas conectadas por axones; las propias células son redes de moléculas concatenadas mediante reacciones bioquímicas. Las sociedades humanas son, también, redes de individuos vinculados por relaciones afectivas y lazos familiares o profesionales. A escala mayor, cabe representar mediante redes los ecosistemas y las cadenas tróficas. Y las redes aparecen por doquier en la técnica: sirvan de ejemplo Internet, las redes de distribución de electricidad o los sistemas de transporte. Incluso el idioma de que nos valemos para llevar hasta el lector estos pensamientos es una red, compuesta por palabras enlazadas por relaciones sintácticas.

Mas, a pesar de la importancia y ubicuidad de las redes, es poco el conocimiento que se ha tenido de su estructura y propiedades. ¿Cómo pueden las interacciones de unos pocos nodos genéticos que funcionen de modo defectuoso desembocar en un cáncer? ¿Por qué son tan rápidos los fenómenos de difusión en ciertos sistemas sociales o de comunicaciones, que originan epidemias o virus informáticos? ¿Cómo siguen funcionando ciertas redes a pesar de que haya fallado una gran mayoría de sus nodos?

Tales preguntas han empezado a recibir respuesta en investigaciones recientes. A lo largo de los últimos años se ha descubierto que en una variedad de campos, muchas redes, se trate de la Telaraña, el metabolismo celular o las relaciones de los intérpretes cinematográficos, están dominadas por un número no muy grande de nodos que se hallan, a su vez, conectados a muchos lugares. Las redes que contienen este tipo de nodos importantes —llamados "cubos" (*hubs*) en la jerga, por analogía con el cubo de una rueda y sus muchos radios— tienden a exhibir "independencia de escala", en el sentido de que ciertos cubos parecen tener un número ilimitado de enlaces y de que ningún nodo es representante típico de los demás. Estas redes se comportan asimismo de ciertas formas predictibles. Ofrecen, por ejemplo, una notable robustez ante fallos accidentales, pero, por otra parte, son sumamente vulnerables a los ataques coordinados.

Los descubrimientos mencionados son responsables de un giro copernicano con respecto a cuanto creíamos saber acerca del mundo complejo e interconectado que nos rodea. Los cubos, no explicados en las teorías previas sobre las redes, ofrecen pruebas convincentes de que diversos sistemas complejos poseen una arquitectura estricta, regida por leyes fundamentales: leyes que son válidas por igual para las células, los ordenadores, los idiomas y la sociedad. Estos principios organizativos tienen, además, importantes consecuencias para el desarrollo de mejores fármacos, para la defensa de Internet frente al vandalismo cibernético y para detener la propagación de epidemias, entre otras aplicaciones.



BURCH/CHESWICK MAP
CORTESIA DE LUMETA CORPORATION

Redes sin escala

El autor

ALBERT-LASZLO BARABASI y ERIC BONABEAU estudian el comportamiento y las características de una miríada de sistemas complejos, de Internet a las colonias de insectos. Barabási ocupa la cátedra Emil T. Hofman de física en la Universidad de Notre Dame. Bonabeau es científico jefe de Icosystem, que aplica la ciencia de la complejidad al descubrimiento de nuevas oportunidades empresariales.

Desde hace más de 40 años, la ciencia ha venido tratando a todas las redes complejas como si fueran puramente aleatorias. Este paradigma enraíza en el trabajo de dos matemáticos húngaros, el inimitable Paul Erdös y Alfréd Rényi, estrecho colaborador suyo. En 1959, con las miras puestas en describir las redes observables en las comunicaciones y en las ciencias biológicas, sugirieron que estos sistemas podrían modelizarse eficazmente interconectando sus nodos mediante enlaces distribuidos al azar. La sencillez de su método y la elegancia de algunos de sus teoremas insuflaron nueva vida a la teoría de grafos y posibilitaron el nacimiento de una especialidad matemática centrada en el estudio de las redes aleatorias.

Una importante predicción de la teoría de redes aleatorias es que, a pesar de que los enlaces de una red se hayan distribuido al azar, el sistema resultante será profundamente democrático: la mayoría de los nodos contará, aproximadamente, con el mismo número de enlaces. En una red aleatoria el número de enlaces por nodo se atiene a una distribución de Poisson, acampanada, y resulta en extremo raro hallar nodos que cuenten con números notablemente mayores o menores que la media. Las redes aleatorias reciben también el nombre de redes exponenciales, porque la probabilidad de que un nodo se encuentre conectado con otros k sitios decrece exponencialmente para valores grandes de k.

Cuando en 1998 nos embarcamos, junto con Hawoong Jeong y Réka Albert, de la Universidad de Notre Dame, en un proyecto de cartografiado de la Telaraña, esperábamos encontrarnos una red aleatoria. He aquí la razón: cuando un internauta decide a qué sitios vincular sus documentos, atiende solamente a su interés particular, y dada la diversidad de los intereses de cada cual, y el tremendo número de páginas entre las que se puede elegir, el patrón de conexiones resultante debería mostrar un aspecto francamente aleatorio.

Las mediciones efectuadas, sin embargo, fueron contrarias a esta conjetura. El programa que se ideó en ese proyecto para tal fin iba saltando de unas páginas a otras, recopilando todos los enlaces que le era posible. Aunque este robot virtual cubría tan sólo una diminuta porción de la Red, el mapa que fue construyendo reveló algo sumamente inesperado, a saber: que son unas pocas páginas muy conectadas las que, en esencia, mantienen a la Telaraña de una pieza. Más del 80 por ciento de las páginas del mapa recibían menos de cuatro enlaces, mientras que a una minoría muy pequeña, inferior al 0,01 por ciento de todos los nodos, les llegaban más de 1000. (Una exploración posterior de la Red reveló que existía un documento al que hacían referencia más de 2 millones de páginas.)

El recuento del número de páginas que tenían exactamente k enlaces puso de manifiesto que su distribución seguía una ley potencial: la probabilidad de que un nodo tomado al azar estuviera conectado con otros k nodos era proporcional a $1/k^n$. El valor de n para los enlaces recibidos era aproximadamente 2, lo que entraña que es unas cuatro veces más probable que un nodo reciba un cierto número de enlaces que el doble de ese número. Las distribuciones potenciales son muy distintas de las acampanadas, características de las redes aleatorias. Concretamente, una ley de distribución potencial carece, a diferencia de la campana, de cúspide y está descrita, en cambio, por una función monótonamente decreciente. La gráfica de una función potencial, representada en unos ejes de coordenadas con graduación logarítmica, es una línea recta. En contraste con la distribución democrática de enlaces que se observa en las redes aleatorias, las leyes potenciales describen sistemas en los cuales dominan unos pocos cubos o *hubs* (por ejemplo, Yahoo o Google).

En las redes aleatorias, los cubos están, sencillamente, prohibidos. Cuando empezamos a cartografiar la Red esperábamos que el orden de conexión de los nodos siguiera una distribución aproximadamente acampanada, similar a la de las estaturas de un grupo extenso de personas. Descubrimos, en cambio, ciertos nodos que desafiaban toda explicación, algo así como si nos hubiéramos encontrado un número significativo de personas de 30 metros de alto. Ello nos indujo a acuñar la expresión "redes sin escala."

La abundancia de redes sin escala

A lo largo de estos últimos años se han descubierto estructuras sin escala en una asombrosa diver-

Resumen/*Redes sin escala*

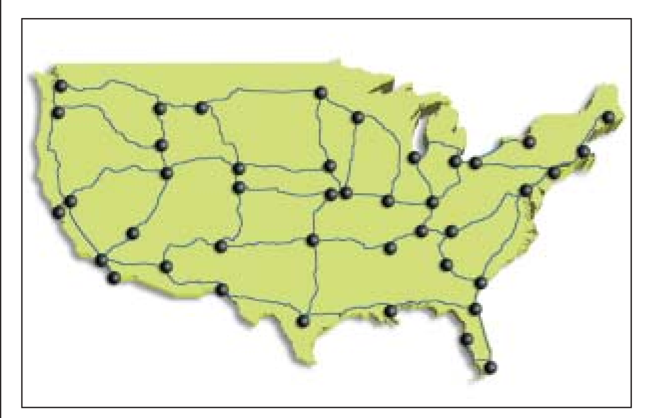
- Diversos sistemas complejos comparten una importante propiedad: algunos nodos cuentan con un enorme número de vínculos a otros nodos, mientras que la gran mayoría tiene apenas unos pocos. Los nodos muy conectados, llamados "cubos", pueden recibir centenares, millares e incluso millones de enlaces. En este sentido, la red parece carecer de escala.
- Las redes sin escala poseen ciertas características de interés. Son, por ejemplo, robustas frente a los fallos fortuitos. Pero, por otra parte, resultan, también, vulnerables a los ataques coordinados.
- El conocimiento de tales características podría originar nuevas aplicaciones en numerosos campos. En informática, por ejemplo, se podrían idear estrategias más eficaces para impedir la infiltración de virus en las redes de Internet.

REDES ALEATORIAS Y REDES SIN ESCALA

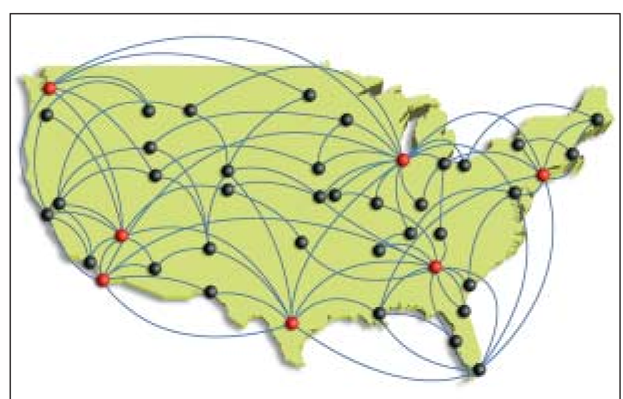
Las redes aleatorias, semejantes a la red viaria de EE.UU. (*simplificada en el mapa de la izquierda*), constan de nodos interconectados al azar. En tales sistemas, la representación gráfica de la distribución de vínculos nodales es acampanada (*curva de la izquierda*) y la mayoría de los nodos tienen similar número de enlaces.

Las redes sin escala, en cambio, más semejantes al sistema de las líneas aéreas (*simplificado en el mapa de la derecha*), contiene cubos (*en rojo*), es decir, nodos con un gran número de enlaces. En ellas, la distribución de enlaces internodales se rige por una ley potencial (*curva central*), pues, aunque hay una gran mayoría de nodos con pocos enlaces , unos pocos cuentan con un número alto de vínculos. En este sentido, el sistema "no tiene escala". La característica definidora de tales redes estriba en la distribución de enlaces: al ser representada en ejes de escala logarítmica (*gráfica de la derecha*), da por resultado una línea recta.

Red aleatoria

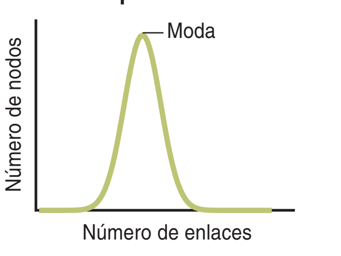


Red sin escala

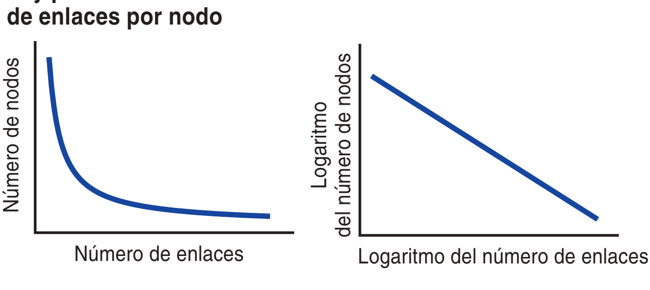




Distribución acampanada del número de enlaces por nodo



Ley potencial de distribución del número de enlaces por nodo



sidad de sistemas. Al estudiar la Telaraña —la *World Wide Web*—, fijamos nuestra atención en la red *virtual* definida por los hipervínculos existentes entre las páginas. En cambio, los hermanos Michalis, Petros y Christos Faloutsos analizaron la estructura *material* de Internet. Estudiaron a tal fin los enrutadores conectados por líneas de comunicaciones, ópticas o de otros tipos, y descubrieron que también la topología de esa red carece de escala.

Otros estudios han descubierto asimismo que también ciertas redes sociales carecen de escala. Por ejemplo, una investigación efectuada en cooperación por científicos de las universidades de Boston y de Estocolmo ha hallado que una red de relaciones sexuales en Suecia obedecía a una ley potencial: aunque la mayoría de los individuos tenía solamente unos pocos compañeros sexuales a lo largo de su vida, había unos cuantos (los "cubos") que los contaban por centenares. Otro estudio reciente, dirigido por Stefan Bornholdt, de la Universidad de Kiel, llegó a la conclusión de que la red de internautas conectados mediante el correo electrónico carece igualmente de escala. Sidney Redner, de la Universidad de Boston, puso de manifiesto que la red de artículos científicos, conectados por las citas que de ellos se hacen, sigue también una ley potencial. Y Mark Newman, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, examinó las colaboraciones entre científicos en varias disciplinas, entre ellas, en medicina y en informática, y halló que también constituían redes sin escala, corroborando un estudio que realizamos nosotros, centrado en matemáticos y neurólogos. (Resulta interesante que uno de los cubos mayores de la comunidad matemática sea el propio Erdös, quien escribió no menos de 1400 artículos con no menos de 500 coautores.)

Entre las empresas aparecen también redes sin escala. El análisis de la formación de redes de alianzas en la industria biotecnológica estadounidense ha descubierto claros cubos: empresas que, como Genzyme, Chiron y Genentech, contaban con un número desproporcionadamente grande de asociaciones con otras empresas. Esa misma red fue examinada más a fondo por unos investigadores italianos. Valiéndose de datos

SLIM FILMS

recopilados por la base de datos de laboratorios farmacéuticos de la Universidad de Siena, que proporciona en la actualidad información de unos 20.100 acuerdos de investigación y desarrollo entre más de 7200 organizaciones, hallaron que los cubos descubiertos por los estadounidenses formaban parte de una red sin escala.

Incluso la red de los actores de Hollywood —popularizada por el juego "A seis pasos de Kevin Bacon", en el que los jugadores tratan de llegar hasta Bacon pasando de unos actores a otros por medio de las películas en que aparecieron juntos— carece de escala. Un análisis cuantitativo mostró que también está dominada por cubos. Aunque la mayoría de los intérpretes tiene sólo unos cuantos enlaces con otros, hay un grupo, como Rod Steiger y Donald Pleasence, que cuentan por miles las conexiones. (Dicho sea de paso, en una lista de los actores más conectados, Bacon sólo ocupaba el puesto 876.)

Ya más en serio, también en el reino de la biología encontramos redes sin escala. En colaboración con Zoltán Oltvai, de la Universidad del Noroeste, hemos encontrado estructuras sin escala en las redes del metabolismo celular de 43 organismos tomados de los tres reinos de la vida, entre ellos *Archaeoglobus fulgidus* (una archibacteria), *Escherichia coli* (una eubacteria) y *Caenorhabditis elegans* (un gusano). Las células se nutren en esas redes mediante la fragmentación de moléculas complejas, que libera energía. Cada nodo es una molécula concreta; cada enlace, una reacción bioquímica. Observamos que la mayoría de las moléculas intervienen en una o dos reacciones solamente, salvo unas cuantas (los cubos), así las moléculas de agua o el ATP (adenosín trifosfato), que interviene en la mayoría.

Hemos descubierto asimismo que carece de escala la red de las interacciones proteínicas celulares. En ella, dos proteínas están "conectadas" si se sabe que interactúan. Cuando investigamos la levadura de la cerveza, una de las células eucariotas (células con núcleo) más sencillas, en la que actúan miles de proteínas, descubrimos una topología sin escala: aunque casi todas las proteínas interaccionan sólo con una o dos más, hay unas pocas capaces de ligarse materialmente a un enorme número. Encontramos un resultado similar en la red de las interacciones proteínicas de un organismo muy diferente de la levadura, la bacteria *Helicobacter pylori*.

Cuanto más se estudiaban las redes, más estructuras sin escala se descubrían. Estos hallazgos planteaban una importante cuestión: ¿A qué se debe que sistemas tan diferentes como una célula e Internet tengan una misma arquitectura y obedezcan las mismas leyes? Estas estructuras no sólo carecen de escala, sino que comparten también una propiedad: por razones que todavía ignoramos, el valor de n del término k^n de la ley potencial tiende a estar comprendido entre 2 y 3.

Ejemplos de redes sin escala

RED	NODOS	ENLACES
Metabolismo celular	Moléculas que extraen energía de los alimentos	Participación en la misma reacción bioquímica
Hollywood	Actores y actrices	Actuar en la misma película
Internet	Enrutadores	Conexiones, por fibra óptica o de otro tipo
Red proteínica reguladora	Proteínas que contribuyen a regular la actividad celular	Interacciones entre proteínas
Colaboración en investigaciones científicas	Científicos	Coautoría de publicaciones
Relaciones sexuales	Personas	Contacto sexual
Telaraña (WWW)	Páginas y sitios	Localizadores universales de recursos (URL)

Dinero llama a dinero

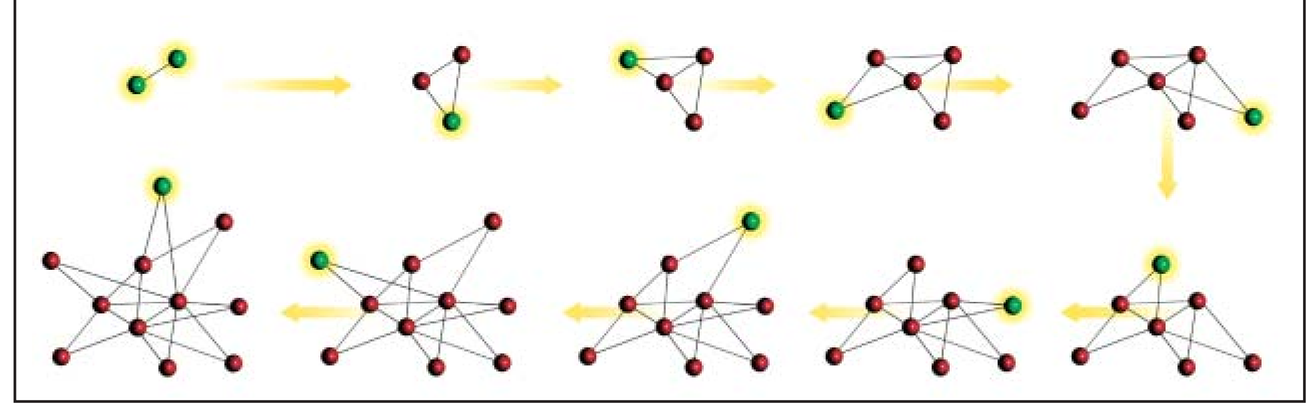
Quizá haya un problema más hondo: ¿por qué la teoría de redes aleatorias no logra explicar la existencia de los cubos? Un examen más minucioso del trabajo de Erdös y Rényi revela dos causas.

Erdös y Rényi, al desarrollar su modelo, supusieron que, antes de establecer los enlaces, disponían del inventario completo de los nodos. Pero el número de nodos de la Telaraña no es constante en absoluto. En 1990 incluía una sola página; ahora, más de tres mil millones. La mayoría de las redes han experimentado una expansión similar. En 1890 había en Hollywood sólo una docena de actores; hoy son más de medio millón. Internet disponía de unos cuantos enrutadores hace tres decenios, pero su número ha ido creciendo sin cesar y ahora contiene millones, conectándose siempre los nuevos a los ya integrados en la red. Gracias a la naturaleza creciente de las redes reales, los nodos más antiguos tuvieron mayores oportunidades de adquirir enlaces.

Por otra parte, no todos los nodos son iguales. En el momento de decidir a cuáles vamos a enlazar nuestra página de la Telaraña, podemos elegir entre miles de millones de ubicaciones. Ahora bien, ¿quién conoce de la Telaraña algo más que una diminuta porción? Y ese subconjunto que nos es familiar suele incluir los sitios más conectados, porque son las más fáciles de hallar. La simple acción de vincularse a estos nodos ejercita y refuerza el sesgo en su favor. Tal proceso de "preferencia de adscripción" se da por doquier. En Hollywood, los intérpretes más conectados son los que mayores posibilidades tienen de ser elegidos para nuevos papeles. En Internet, los enrutadores más conectados, por lo común con un mayor ancho de banda, son los más deseables para los nuevos usuarios. En la industria biotecnológica estadounidense,

ASI SE GESTA UNA RED SIN ESCALA

En este ejemplo, una red sin escala va creciendo paso a paso de 2 a 11 nodos. Un nuevo nodo (*en verde*), al optar por el nodo con el que establecer un enlace, prefiere vincularse a uno de los existentes (*en rojo*) que tenga ya muchas otras conexiones. Estos dos mecanismos básicos —el crecimiento y la preferencia en la adscripción— acabará originando un sistema dominado por cubos, es decir, por nodos provistos de un enorme número de enlaces.



SLIM FILMS

las compañías bien establecidas, como Genzyme, tienden a atraer más alianzas, con lo que aumenta su credibilidad para futuras asociaciones. Análogamente, los artículos más citados en la bibliografía científica incitan a un número mayor de investigadores a leerlos y citarlos, fenómeno que Robert K. Merton ha denominado “efecto Mateo”, en alusión al pasaje del Evangelio de San Mateo: “Pues a quien tiene se le dará, y poseerá en abundancia”.

Con estos dos mecanismos —el crecimiento y la adscripción preferente— se explica la existencia de los cubos: los nodos, conforme van apareciendo, tienden a conectarse a los sitios más conectados ya, y estos sitios, populares, adquieren así, con el transcurso del tiempo, más enlaces que sus vecinos no tan conectados. Semejante proceso de “dinero llama a dinero” favorecerá, por lo general, a los nodos más antiguos, que contarán con mayores posibilidades de llegar a ser cubos.

Nos hemos valido, en colaboración con Réka Albert, de simulaciones y cálculos computarizados con el fin de demostrar que una red en crecimiento en la que exista preferencia de adscripción se convertirá en una red sin escala, y que la distribución de probabilidad de sus nodos obedecerá a una ley potencial. Aunque este modelo teórico es simplista y hay que adaptarlo a situaciones concretas, parece confirmar nuestra explicación de la ubicuidad de las redes sin escala en el mundo real.

El crecimiento, sumado a la adscripción preferente, puede contribuir incluso a explicar la presencia de redes sin escala en sistemas biológicos. Se ha descubierto, por ejemplo, que las moléculas más conectadas de la red metabólica de *E. coli* propenden a tener un historial evolutivo: se cree que algunas de ellas son remanentes del llamado “mundo del ARN” (el estadio evolutivamente previo a la aparición del ADN) y que otras participan en las vías metabólicas más antiguas.

Resulta interesante que el mecanismo de adscripción preferente tienda a la linealidad. Dicho de otro modo: la probabilidad de que un nodo nuevo se vincule a un nodo que cuenta con el doble de conexiones que su vecino, dobla la probabilidad de que se conecte a éste. La correspondiente representación gráfica sería una línea recta. Redner y sus colegas de la Universidad de Boston, y otros investigadores, han examinado distintos tipos de adscripción preferente y han encontrado que si el mecanismo supera la linealidad (por ejemplo, si la probabilidad de que un nodo nuevo se vincule a un nodo que cuenta con el doble de conexiones que su vecino cuadriplica la probabilidad de que se conecte a éste), un solo cubo tenderá a quedarse con la parte del león de las conexiones. En estos supuestos, donde “el vencedor se lo lleva todo”, la red acaba adoptando una topología en estrella, con un cubo central.

Un talón de Aquiles

Al depender la humanidad, de forma creciente, de las redes de energía eléctrica y de las mallas de comunicaciones, ha cundido una inquietud: “¿Hasta qué punto son de fiar esas redes?”. La buena noticia es que los sistemas complejos pueden ser enormemente resistentes a los fallos accidentales. De ordinario, son cientos los enrutadores de Internet que se “caen” en un momento dado, pero la red no suele sufrir perturbaciones serias. Caracteriza a los seres vivos un grado de robustez similar: rara vez acusamos las consecuencias de los millares de errores —mutaciones, plegamientos incorrectos de las proteínas— que se producen en nuestras células. ¿Dónde tiene su origen esta robustez?

La intuición nos dice que la avería de un número grande de nodos provocará la inevitable fragmentación de la red. Ciertamente, así ocurre en las redes aleatorias: si en ellas se elimina una fracción crítica de nodos, se descompondrán en islas diminutas e incomunicadas. En cambio, la simulación de las redes sin escala refiere una historia muy distinta. Hasta un 80 por ciento de los enrutadores de Internet, escogidos al azar, podrían fallar, y aun así los

restantes formarían todavía un conjunto compacto en el que seguiría existiendo al menos una ruta entre dos nodos cualesquiera. No menos difícil resulta romper la red de interacción proteínica de una célula: nuestras mediciones indican que, incluso tras la introducción de un elevado número de mutaciones aleatorias, las proteínas no afectadas seguirían trabajando conjuntamente.

En general, las redes sin escala exhiben una sorprendente robustez frente a los fallos accidentales, propiedad que dimana de la inhomogeneidad de su estructura topológica. La remoción aleatoria de nodos afecta sobre todo a los pequeños, porque éstos son mucho más numerosos que los cubos. Y la eliminación de nodos pequeños no perturbará gravemente la topología de la red, porque contienen pocos enlaces en comparación con los cubos, que están, en cambio, conectados prácticamente a todo. Pero ponerse en manos de los cubos presenta un serio inconveniente: la vulnerabilidad ante los ataques.

En una serie de simulaciones, descubrimos que bastaba la remoción de unos cuantos cubos vitales en Internet para que el sistema se escindiera en grupos diminutos de enrutadores aislados sin remedio. De igual manera, experimentos con la levadura han demostrado que la remoción de las proteínas más conectadas presenta una probabilidad mucho mayor de matar al organismo que la eliminación de otros nodos. Esos cubos son cruciales; si las mutaciones los tornan disfuncionales, es muy probable que la célula muera.

Depender de los cubos resultará ventajoso o no, según el sistema. Sin duda, la resistencia a las averías que suceden al azar es buena cosa tanto para Internet como para las células. Por otra parte, la dependencia de la célula respecto a sus cubos proporciona a la investigación farmacéutica nuevas estrategias de selección de dianas para los fármacos, que podrían fructificar en tratamientos que solamente matasen las bacterias o células malignas, sin afectar a los tejidos sanos. Por otra parte, el riesgo de que un pequeño grupo de cibernautas bien informados pueda echar abajo toda la infraestructura de comunicaciones dirigiendo ataques certeros a sus cubos constituye motivo de seria preocupación.

El talón de Aquiles de las redes sin escala suscita otra cuestión apremiante: ¿cuántos son los cubos esenciales? Investigaciones recientes sugieren que, en términos generales, bastaría con eliminar de un 5 a un 15 por ciento de los cubos para que el sistema se viniera abajo. En el caso de Internet, nuestros experimentos inducen a pensar que un ataque muy bien coordinado, que eliminase en primer lugar al cubo más grande, después, al segundo en tamaño, y así sucesivamente, provocaría colapsos importantes en cuanto hubiese acabado con unos pocos cubos. En consecuencia, tal vez la forma más eficaz de evitar perturbaciones a gran escala provocadas por ataques cibernéticos consista en proteger los cubos. No obstante, hace falta todavía mucho trabajo para conocer con precisión qué grado de fragilidad tienen las redes específicas. Por ejemplo, ¿es posible que el fracaso de varios cubos, como Genzyme o Genentech, provocase el desplome de toda la industria biotecnológica de los Estados Unidos?

Epidemias sin escala

Lo que sabemos sobre redes sin escala nos informa a su vez sobre la difusión de los virus informáticos, las enfermedades contagiosas y las modas. Las teorías de difusión, ampliamente estudiadas desde hace decenios tanto en la epidemiología como en la mercadotecnia, hablan de un umbral crítico necesario para que llegue a producirse un contagio que alcance a toda una población. Cualquier virus, enfermedad o moda cuya tasa de contagio sea inferior a ese valor umbral bien definido, acabará por extinguirse sin remedio, mientras que cuando superan el umbral proliferan exponencialmente y acaban por invadir el sistema completo.

Romualdo Pastor Satorras, de la Universidad Politécnica de Cataluña, y Alessandro Vespigniani, del Centro de Física Teórica de Trieste, han llegado, sin embargo, a una conclusión inquietante. Han descubierto que en una red sin escala el valor umbral es 0. Es decir, que todos los virus, incluso los poco contagiosos, se extenderán y perdurarán en el sistema. Este resultado explica por qué Love Bug, el virus informático más

Posibles repercusiones de las redes sin escalas en...

Informática

- Las redes informáticas con arquitectura sin escala, como la Telaraña, son muy resistentes a los fallos fortuitos. Resultan, en cambio, vulnerables a los ataques bien calculados.
- En Internet, la erradicación de virus, incluso de los conocidos, pudiera resultar imposible.

Medicina

- Las campañas de vacunación contra virus peligrosos alcanzarían quizá la máxima eficacia si se concentrasen en los cubos: personas que tienen muchos contactos con otras. Empero, la identificación de tales individuos puede ser difícil.
- La cartografía de las redes intracelulares humanas podría facilitar el descubrimiento y control de los efectos secundarios de los medicamentos. Además, la identificación de las moléculas cruciales que intervienen en ciertas enfermedades conduciría a la creación de nuevos fármacos.

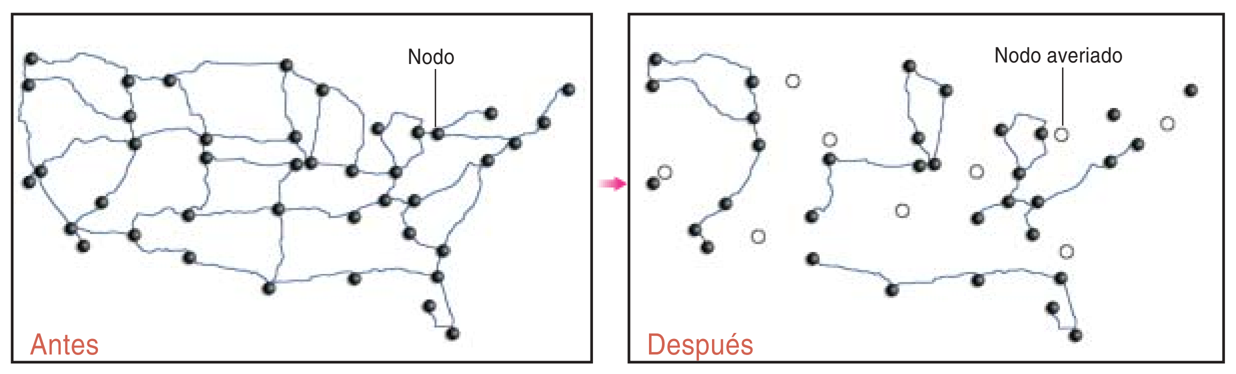
Economía

- El conocimiento de las mutuas vinculaciones de las empresas, sectores y economías nacionales podría facilitar su supervisión y control, para evitar quiebras en cadena.
- El estudio de propagación de un contagio en una red sin escala podría ofrecer nuevas técnicas publicitarias.

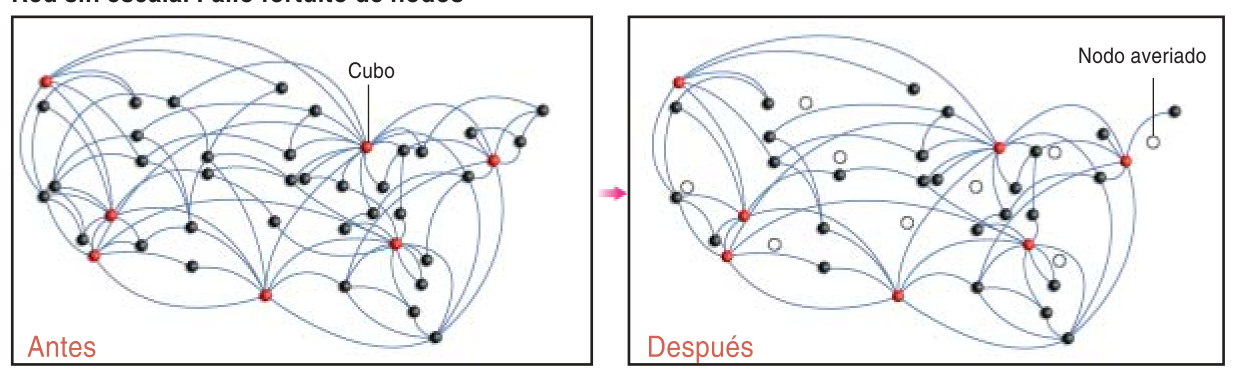
LA ROBUSTEZ DE LAS REDES (ALEATORIAS Y SIN ESCALA)

En una red aleatoria, el fallo fortuito de cierto número de nodos (*paneles superiores*) puede fragmentar el sistema en islotes incomunicados. Las redes sin escala, por el contrario, ofrecen mayor robustez a tales fallos (*paneles centrales*). Pero son muy vulnerables a los ataques coordinados contra sus cubos (*paneles inferiores*).

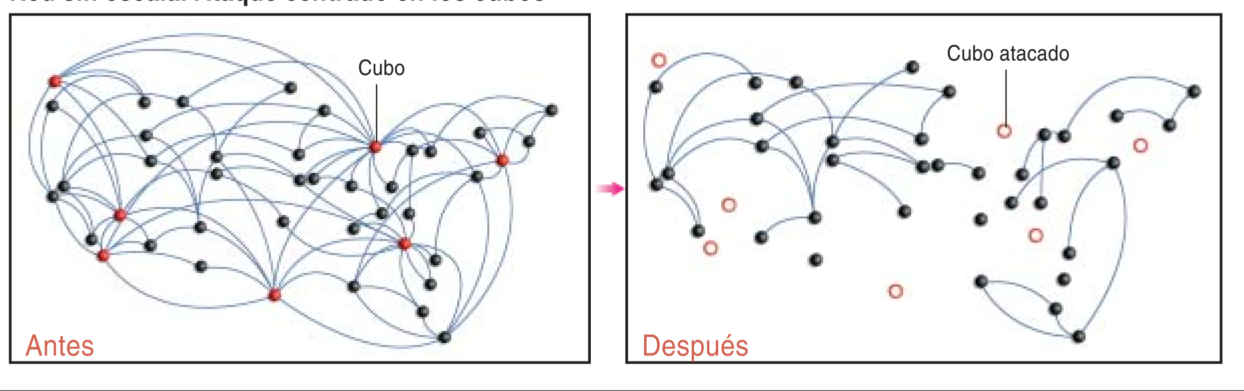
Red aleatoria. Fallo fortuito de nodos



Red sin escala. Fallo fortuito de nodos



Red sin escala. Ataque centrado en los cubos



SLIM FILMS

dañino hasta la fecha (consiguió cerrar el Parlamento británico en 2000), seguía siendo todavía uno de los virus más extendidos al año de su presunta erradicación.

Dado que los cubos se hallan conectados a otros muchos nodos, es probable que un cubo llegue a quedar infectado por alguno de los nodos corruptos. Y en cuanto un cubo haya sido infectado, traspasará el virus a muchos otros sitios, con lo que acabará poniendo en peligro a otros cubos, desde los cuales el virus se propagará al sistema entero.

La propagación de los virus biológicos por las redes sociales, que en muchos casos parecen no tener escala, sugiere que deberían reinterpretarse las investigaciones dedicadas a la interacción entre la topología de redes y las epidemias. En una red sin escala, la política sanitaria tradicional, basada en la vacunación aleatoria, podría fracasar muy fácilmente, porque sería probable que dejase sin protección a un buen número de cubos. Habría que vacunar a casi toda la población para garantizar que no se habían omitido cubos. Una vacuna contra el sarampión, por ejemplo, ha de cubrir al 90 por ciento de la población para resultar eficaz.

En lugar de inmunizaciones al azar, pues, ¿no convendría que los médicos se concentrasen en los cubos, es decir, en los individuos más conectados? La investigación en redes sin escala indica que esta segunda metodología podría ser eficaz aun cuando la inmunización alcanzase solamente a una pequeña parte de la población total, con tal de que esa porción contuviese a todos los cubos.

Claro que la identificación de los cubos en una red social resulta mucho más difícil que en sistemas de otros tipos. No obstante, Reuven Cohen y Shlomo Havlin, de la Universidad Bar-Illan de Israel, han propuesto una sagaz solución: inmunizar a una pequeña parte, escogida al azar, de los conocidos de individuos tomados, a su vez, al azar. De esta manera es muy probable que se seleccionen cubos, ya que están conectados con mucha gente. Tal proceder, empero, suscita cierto número de dilemas éticos. Por ejemplo, si se supone que es posible identificar los cubos, ¿deberían éstos tener prioridad en la inmunización y en los tratamientos? Pese a tales problemas, la detección y tratamiento de los cubos podría constituir la solución más pragmática en la futura distribución de vacunas contra el sida o la viruela en países que carecen de recursos para atender a toda la población.

En muchos contextos comerciales, lo que se desea no es detener epidemias, sino provocarlas. Las campañas "víricas" de la mercadotecnia suelen estar dirigidas específicamente a los cubos, con ánimo de acelerar la adopción de un producto. Tal estrategia, como es obvio, no constituye ninguna novedad. Por los años cincuenta, un estudio financiado por los laboratorios Pfizer desveló el importante papel que desempeñan los cubos en la rapidez con que una comunidad de médicos procede a recetar un fármaco nuevo. Los comerciales saben intuitivamente, des-

El mundo es un pañuelo

En 1967, Stanley Milgram, psicólogo social de Harvard, envió varios cientos de cartas a residentes en Nebraska, pidiéndoles que las remitieran a otros conocidos suyos, con la idea de que, por esa vía, le llegara el mensaje a su destinatario deseado: un agente de bolsa de Boston. Para reconstruir las trayectorias de la misiva, Milgram rogaba a los participantes que le mandasen una postal cuando transfiriesen la carta a otra persona. Milgram observó que las cartas que finalmente llegaron a su destino final habían pasado, en promedio, por seis individuos, hallazgo que fundamenta la popular opinión de que hay "seis grados" de separación entre dos personas cualesquiera.

A pesar de que el trabajo de Milgram a duras penas pueda ser tenido por concluyente —entre otras cosas, porque la mayoría de las cartas nunca llegaron al destinatario—, se ha descubierto que otras redes comparten esta propiedad de "pequeñez". Nosotros, por ejemplo, hemos descubierto que casi todos los metabolitos intracelulares pueden conectarse mediante una ruta de sólo tres reacciones. En la Telaraña, que contiene más de 3000 millones de documentos, mediante 19 "clics" es posible, en general, llegar desde una página a otra cualquiera.

Esta propiedad de pequeñez no entraña necesariamente la presencia de ningún mágico principio organizador. Incluso una red aleatoria, con vínculos establecidos al azar, será un "pañuelo". Cada uno de nosotros puede tener, sea por caso, unos 1000 conocidos. Si cada una de estas personas conociera a otras 1000, tendríamos a 1.000.000 de personas a dos pasos de distancia, a 1000 millones a tres y a toda la población mundial a cuatro. En vista de ello, parecerá casi trivial que dos personas que se desconozcan puedan llegar a encontrarse en sólo seis pasos. Un examen más cuidadoso revela, sin embargo, consideraciones más profundas.

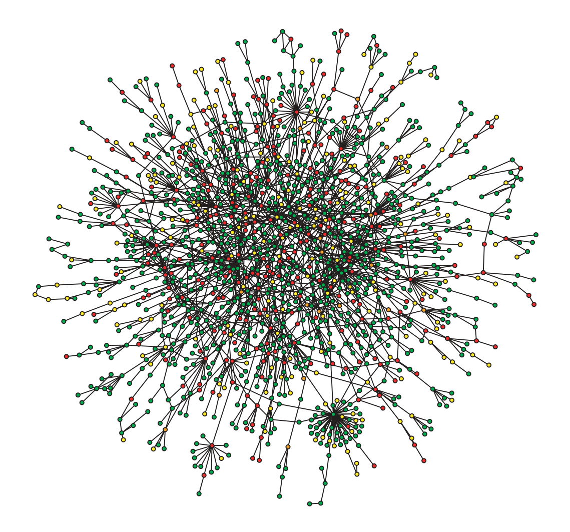
El cálculo anterior, muy simplista, supone que las personas que nosotros conocemos se desconocen entre sí. No hay tal. En realidad, la sociedad está fragmentada en "racimos" o "piñas", integrados por individuos de rasgos afines (como pueden ser sus ingresos o sus intereses), hecho muy estudiado en sociología desde hace unos 30 años, tras el trabajo seminal de Mark Granovetter. El apiñamiento es igualmente una propiedad general de otros muchos tipos de redes, y ha sido descubierto en una multitud de sistemas, que van desde la red eléctrica de EE.UU. hasta la red neuronal del gusano *Caenorhabditis elegans*.

A primera vista, los racimos aislados de nudos muy interconectados parecen ir contra la topología de las redes sin escala, en las que existe un cierto número de cubos cuyos radios atraviesan el sistema, conectándolo todo. No obstante, hemos demostrado recientemente la compatibilidad de ambas propiedades: una red puede estar compuesta por racimos y carecer de escala si pequeñas piñas de nodos estrechamente interconectados se vinculan a grupos mayores, menos cohesionados (*a la izquierda*). Parecen existir jerarquías de este tipo en buen número de sistemas, desde la Telaraña (donde encontramos racimos de páginas dedicadas a un mismo tema) hasta las células (donde los agregados son equipos de moléculas encargadas de una determinada función).

Cúmulos de distinto nivel jerárquico

ESTOS RACIMOS JERARQUICOS, representados esquemáticamente, podrían incluir, digamos, las páginas de la Telaraña dedicadas a la Casa Milà de Antoni Gaudí (*en amarillo*), conectadas, a su vez con otros racimos (*en verde*) dedicados a Gaudí, a la arquitectura modernista, a Barcelona o a los desfiles de modas. Estos sitios podrían, a su vez, estar conectados a otros racimos (*en rojo*) dedicados, por ejemplo, a arquitectos famosos o la arquitectura en general.

SLIM FILMS



2. ESTE MAPA de las proteínas que interaccionan en una levadura pone de manifiesto que ciertas proteínas muy interconectadas —proteínas "cubo"— resultan cruciales para la supervivencia de las células. Se han representado en rojo las proteínas esenciales (cuya eliminación entraña la muerte de la célula). Las proteínas en naranja revisten cierta importancia (su remoción lentifica el crecimiento celular). Los colores verde y amarillo representan proteínas de interés menor o desconocido, respectivamente.

CORTESIA DE HAWOONG JEONG

de hace mucho, que ciertos clientes resultan mucho más eficaces a la hora de difundir las excelencias de productos y modas. Pero trabajos recientes sobre las redes sin escala están proporcionando el marco científico y el instrumental matemático requerido para sondear con mayor rigor este fenómeno.

De la teoría a la práctica

A pesar de la ubicuidad de las redes carentes de escala, existen numerosas y destacadas excepciones. Por ejemplo, las redes de carreteras y de energía eléctrica de EE.UU. no muestran independencia de escala. Tampoco la mayoría de las redes que se observan en la ciencia de los materiales. En las redes cristalinas, los átomos tienen todos el mismo número de enlaces con sus vecinos. En el caso de otras redes, los datos no son concluyentes. El tamaño pequeño de las redes tróficas, que plasman las interdependencias entre las presas y sus depredadores, no ha permitido determinar con claridad a qué tipo pertenecen. Asimismo, que no se disponga de grandes mapas de conectividad del cerebro ha impedido conocer la naturaleza de esta importante red.

Pese a que averiguar si una red carece de escala importa si se quiere comprender el funcionamiento del sistema, existen otros parámetros que también merecen atención. El diámetro, o longitud de camino, es uno de ellos; es el máximo número de saltos necesario para conectar dos puntos cualesquiera, tomando en cada caso el camino más corto.

Por último, la topología es sólo una de las características generales que deben conocerse para entender una red. Se podría, por ejemplo, incurrir en costes elevados si se añadieran enlaces a un determinado nodo de manera que se impidiese que la red (la viaria de EE.UU., digamos) careciera de escala. En las cadenas tróficas, ciertas presas son más fáciles de atrapar que otras; tiene profundas consecuencias para el ecosistema en su conjunto. En el caso de las redes sociales, los lazos familiares son mucho más fuertes que las conexiones con los simples conocidos; resulta mucho más probable que difundan enfermedades o información. En el caso de los sistemas de transporte, transmisión o comunicaciones (como Internet), uno de los principales factores que se han de tomar en consideración es la posibilidad de que se congestionen enlaces específicos. Un tráfico excesivo por un determinado enlace puede provocar que se venga abajo, y con ello, la caída de enlaces vecinos que se encontrarían con el rebosamiento. Los propios nodos, por otra parte, podrían no ser homogéneos —ciertas páginas de la Telaraña son más interesantes que otras, por ejemplo—; el mecanismo de adscripción preferente se altera profundamente entonces.

A estos y otros factores se debe que apenas se haya empezado a descubrir de verdad el comportamiento de los sistemas que carecen de escala. Los cubos de inmunización podrían no bastar para detener la propagación de una epidemia; tal vez se pudiera hallar una solución más efectiva al considerar no sólo el número de conexiones de cada individuo, sino también la frecuencia y la duración del contacto en esos vínculos.

Para abordar las redes complejas hemos dejado de lado el detalle de enlaces y nodos. Nos ha sido posible entrever así algunos de los principios organizadores que subyacen bajo estos sistemas, en apariencia incomprensibles. Como mínimo, el conocimiento obtenido de esta empresa ha llevado a reconsiderar muchas presunciones básicas. En el pasado, cuando se deseaba ensayar de qué modo afectaría a la congestión de Internet un nuevo protocolo de direccionamiento, se adoptaba como modelo una red aleatoria. Pero ahora sabemos que Internet es un sistema carente de escala, cuyo comportamiento difiere mucho del de una red aleatoria. Por esa razón, John W. Byers y sus colaboradores, de la Universidad de Boston, están remozando los modelos informáticos que habían venido utilizando para la simulación de Internet. De igual manera, el conocimiento de las propiedades de las redes sin escala será valioso en buen número de otros campos, en especial cuando trascienda la mera topología y se explore la intrincada, sutil dinámica que tiene lugar en el seno de esos sistemas complejos.

Bibliografía complementaria

ALL THE WORLD'S A NET. David Cohen en *New Scientist*, vol. 174, n.º 2338, páginas 24-29; 13 de abril de 2002.

STATISTICAL MECHANICS OF COMPLEX NETWORKS. Réka Albert y Albert-László Barabási en *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, págs. 47-97; enero de 2002.

LINKED: THE NEW SCIENCE OF NETWORKS. Albert-László Barabási. Perseus Publishing, 2002.

EVOLUTION OF NETWORKS: FROM BIOLOGICAL NETS TO THE INTERNET AND WWW. J. F. F. Mendes y Sergei N. Dorogovtsev. Oxford University Press, 2003.

Abraham Zacuto y la astronomía europea en el mundo árabo-islámico

El “Almanaque perpetuo” de este astrónomo salmantino es uno de los escasos ejemplos de obras científicas renacentistas traducidas al árabe y difundidas desde Marruecos hasta el Yemen

Julio Samsó

Para qué sirve la astronomía

La astronomía es una disciplina cuyo cultivo ha requerido con frecuencia inversiones económicas importantes desde el momento en el que aparecen los primeros observatorios con instalaciones permanentes, en el siglo XIII. Esto implica que los astrónomos se han visto obligados a convencer al poder político del interés de sus investigaciones y a ofrecer resultados con utilidad práctica para los gobernantes.

A lo largo de la Edad Media el producto que se ofrecía era, principalmente, la predicción astrológica; en ella los gobiernos estaban muy interesados, ya que conocer el futuro implicaba obvias ventajas a la hora de adoptar decisiones políticas. En menor grado, en el marco de la civilización islámica, hubo un intento serio de convencer a la sociedad de las aplicaciones que la astronomía tenía para ciertas necesidades prácticas del culto (determinación del acimut de la alquibla, cálculo de las horas de la oración, condiciones de visibilidad de la luna nueva que marca el principio del mes y otros).

Con la llegada de la Edad Moderna, la astrología seguía muy viva (piénsese, por ejemplo, en el caso de Kepler), pero a ésta se añadió la aplicación de la astronomía a la navegación, con la clara preocupación por la resolución del problema de la determinación de la longitud geográfica en alta mar, que dio lugar a la fundación de la mayoría de los observatorios europeos. Tenemos también la contribución de los astrónomos a problemas de cómputo del tiempo: me limitaré a mencionar la reforma gregoriana del calendario.

En fechas muy recientes la investigación astronómica se ha visto indudablemente beneficiada por los intereses de dos grandes potencias, al menos, por los viajes espaciales y por sus aplicaciones militares. Aunque en alguna ocasión los poderes políticos hayan impuesto sus propios criterios, el balance general ha resultado altamente positivo para la ciencia. Esto puede considerarse una constante a lo largo de la historia.

La labor realizada en los observatorios islámicos de Maraga y Samarcanda o la de los astrónomos judíos de Alfonso X que elaboraron las *Tablas Alfonsíes* trasciende, con mucho, sus aplicaciones astrológicas. En conjunto, pues, parece claro que los astrónomos han sido capaces de “vender” muy bien las aplicaciones de su disciplina y de sacar un alto rendimiento de sus concesiones a los poderes políticos y económicos.

Abraham Zacuto

Del mismo modo siempre me he preguntado hasta qué punto la publicación del *Almanach Perpetuum* de Abraham Zacuto y José Vizinho, aparecido en la ciudad portuguesa de Leiria en 1496, se debió al interés por sus posibles aplicaciones a la navegación astronómica que, por otra parte, eran muy limitadas. La

El autor

JULIO SAMSO, catedrático de la Universidad de Barcelona, lleva varios decenios dedicado a la investigación de la historia de la ciencia árabe. De la proyección internacional de sus trabajos nos habla la publicación de *Islamic Astronomy and Medieval Spain* en la selecta colección “Variorum Reprints”. En su último trabajo resalta la pobre valoración social de matemáticos y astrónomos andalusíes en su tiempo.



1. RECONSTRUCCION de los ecuatorios, de Ibn al-Samḥ, m. 1035 (*a la izquierda*), y de Azarquiel, m. 1100 (*a la derecha*), realizada por Mercè Comes y Honorino Mielgo para la exposición "El legado científico andalusí" (Madrid, 1992). Una copia de cada instrumento se conserva en el Departamento de Arabe de la Universidad de Barcelona y en el Museo Nacional de la Ciencia y de la Técnica (Madrid).

figura de este astrónomo salmantino (1452-c.1515) ocupa una posición central en la astronomía hispánica de la segunda mitad del siglo XV. Surge como resultado del desarrollo de una astronomía judía bajomedieval tanto en la península Ibérica como fuera de ella. Su obra es tributaria de la tradición alfonsí y de los trabajos realizados por otros astrónomos judíos, entre los que destaco, en el sur de Francia en el siglo XIV, a Immanuel ben Jacob Bonfils de Tarascón, Levi ben Gerson y Jacob ben David Bonjorn de Perpiñán y, en Sicilia, a Isaac al-Ḥadib.

En su Salamanca natal vivía todavía en 1474. En fecha indeterminada se desplazó a Gata (Cáceres) y se acogió al mecenazgo de D. Juan de Zúñiga y Pimentel (m. 1504). En 1492 se debió ver obligado a emigrar a Portugal y existe algún tipo de evidencia de que estuviera al servicio de Juan II (m. 1495), así como al de su sucesor Manuel I.

En 1496 se inicia en Portugal la persecución de los judíos por orden del rey Manuel. Zacuto se dirige al norte de Africa. Reside en Fez, Tremecén y Túnez: en esta última ciudad se encontraba aún en 1505. En fecha desconocida se trasladó a Damasco, estaba en Jerusalén en 1513 y debió morir hacia 1515.

La primera obra astronómica importante de Zacuto es el *Ha-ḥibbur ha-gadol*, terminada en Salamanca en 1478. Se trata de un almanaque perpetuo, una colección de tablas astronómicas que permiten calcular la longitud de los planetas con gran rapidez y sin apenas cómputo. Tengamos en cuenta que, si se utilizan unas tablas astronómicas habituales (las *Tablas de Toledo* o las *Tablas Alfonsíes*), calcular la longitud de un solo planeta requiere una media hora de trabajo de un astrónomo competente.

Para levantar un horóscopo se necesita calcular el ascendente (en función de la hora y de la latitud del



TABLAS ALFONSIES

Las *Tablas Alfonsíes* fueron elaboradas, en Toledo, por dos astrónomos judíos (Yehudá ben Moshé e Isḥāq b. Sīd) al servicio del rey Alfonso X, entre 1263 y 1272, tras haber realizado observaciones solares, de conjunciones planetarias y de eclipses solares y lunares. Conservamos dos versiones muy diferentes: por una parte, el texto castellano de unos *cánones* (manual de instrucciones para el uso de las tablas) para los que no se conocen tablas numéricas y que siguen la tradición de las *Tablas de Toledo* (siglo XI); por otra, aparecen en París, a partir de 1320, unas tablas numéricas, con epígrafes en latín, y sin cánones: en esta segunda versión, la influencia astronómica dominante es la del astrónomo oriental al-Battānī (siglo IX).

La falta de cánones motivó que multitud de autores europeos —empezando con el grupo parisiense de Juan de Sajonia, Juan de Murs, Juan de Linières etc.— redactaran cánones originales que pudieran acompañar a estas tablas descabezadas. Estas *Tablas Alfonsíes* latinas conocerán un enorme éxito y se difundirán por toda Europa en multitud de ediciones impresas a partir de la edición *princeps* publicada en Venecia en 1483. Parece bastante claro que estas tablas dominarán el panorama europeo hasta la aparición de las *Tablas Pruténicas* publicadas por Erasmus Reinhold en 1551, siguiendo modelos geométricos copernicanos.

lugar), dividir las casas y calcular la longitud del Sol, la Luna y los cinco planetas visibles sin ayuda de un telescopio (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno), así como del nodo ascendente de la Luna. Todo lo anterior se basa en una serie de operaciones de cálculo que exigirían más de cuatro horas de trabajo de un operario muy bien cualificado, a lo que hay que añadir el tiempo que se requiere para la interpretación del horóscopo. La consecuencia obvia es que este instrumento predictivo es un producto caro.

Para abaratar el proceso, a lo largo del siglo XI y en al-Andalus, se desarrollaron dos técnicas simplificadoras: una de ellas fue la del diseño de los instrumentos llamados *ecuatorios*, que contenían una serie de modelos geométricos ptolemaicos de los planetas, trazados a escala, que permitían resolver gráficamente el problema del cálculo de longitudes reduciendo mucho la necesidad de calcular. La segunda técnica fue la de los almanaques perpetuos, cuya primera documentación parece remontar a una fuente helenística fechable en el siglo II de nuestra era.

La técnica de los almanaques fue recuperada por el astrónomo toledano Azarquiel (m. 1100). Esta técnica utilizaba unos ciclos de origen babilónico (llamados *goal-years* o "años límite"), consistentes en un número entero de años solares (característico de cada planeta), en los cuales el centro del epiciclo planetario realizaba un número entero de revoluciones sobre su deferente y el planeta llevaba a cabo, asimismo, un número entero de revoluciones sobre su epiciclo (*véase el recuadro de la página siguiente*).

El *Ḥibbur* de Zacuto seguía la tradición de Azarquiel, pero sus cálculos se habían realizado utilizando las tablas astronómicas más recientes y fiables: las *Tablas Alfonsíes* (*véase el recuadro de la página anterior*), calculadas por dos judíos toledanos (Yehudá ben Moshé e Isḥāq b. Sīd) en la segunda mitad del siglo XIII. La obra se componía de las dos partes tradicionales: unos cánones o manual introductorio, divididos en 19 capítulos (en recuerdo de los 19 años del ciclo metónico), y unas tablas numéricas basadas en el calendario juliano. El interés fundamental de Zacuto, en esta obra, es el cálculo de las posiciones del Sol y de la Luna —esenciales para el calendario lunisolar judío—, por lo que se preocupa muy especialmente del tema de las conjunciones y oposiciones de estos dos astros, que está directamente relacionado con el cálculo de eclipses solares y lunares. En esta parte de su obra, Zacuto enlaza directamente con la tradición renovadora representada por Levi ben Gerson y por Jacob ben David Bonjorn.

El *Ḥibbur* fue objeto de una serie de traducciones y adaptaciones: el judío portugués José Vizinho redactó una doble serie de cánones (en latín y en castellano) que simplificaban el uso de las tablas y publicó el conjunto con el título de *Almanach Perpetuum*. Esta obra fue impresa repetidamente a partir de la primera edición (Leiria, 1496). En 1481, Juan de Selaya o Salaya, uno de los titulares de la cátedra

Residuuz tabule prime Solis

Dies	septēb			octob			novēb			decēb			Jennā			februā		
	vgo			libra			scōpi9			sagita			capcō			aq̄ri9		
	g	m	2	g	m	2	g	m	2	g	m	2	g	m	2	g	m	2
1	17	34	4	17	9	19	18	19	45	18	54	32	20	38	51	22	9	42
2	18	32	44	18	9	2	19	20	30	19	55	56	21	40	6	23	10	18
3	19	31	24	19	8	45	20	21	24	20	57	22	22	41	21	24	10	53
4	20	30	7	20	8	40	21	22	19	21	58	48	23	42	36	25	11	25
5	21	28	51	21	8	36	22	23	14	23	0	15	24	43	51	26	11	57
6	22	27	35	22	8	32	23	24	10	24	1	42	25	45	6	27	12	29
7	23	26	25	23	8	36	24	25	7	25	3	9	26	46	20	28	12	49
8	24	25	16	24	8	41	25	26	4	26	4	37	27	47	34	29	13	9
9	25	24	7	25	8	46	26	27	9	27	6	7	28	48	47	♓0	13	28
10	26	23	2	26	8	53	27	28	14	28	7	37	29	50	0	1	13	45
11	27	21	57	27	9	0	28	29	20	29	9	7	♒0	51	12	2	14	2
12	28	20	52	28	9	7	29	30	31	♑0	10	37	1	52	24	3	14	18
13	29	19	57	29	9	22	♐0	31	42	1	12	7	2	53	36	4	14	20
14	♎0	19	3	♏0	9	37	1	32	52	2	13	38	3	54	43	5	14	33
15	1	18	9	1	9	52	2	34	7	3	15	8	4	55	50	6	14	40
16	2	17	19	2	10	11	3	35	21	4	16	38	5	56	56	7	14	46
17	3	16	29	3	10	30	4	36	35	5	18	8	6	57	54	8	14	51
18	4	15	40	4	10	50	5	37	49	6	19	36	7	58	52	9	14	56
19	5	15	2	5	11	19	6	39	3	7	21	4	8	59	49	10	14	54
20	6	14	25	6	11	49	7	40	18	8	22	32	10	0	44	11	14	52
21	7	13	48	7	12	19	8	41	33	9	24	0	11	1	39	12	14	50
22	8	13	14	8	12	56	9	42	46	10	25	26	12	2	34	13	14	35
23	9	12	41	9	13	33	10	44	3	11	26	52	13	3	25	14	14	19
24	10	12	8	10	14	6	11	45	18	12	28	16	14	4	16	15	14	3
25	11	11	40	11	14	47	12	46	33	13	29	40	15	5	6	16	13	40
26	12	11	13	12	15	29	13	47	48	14	31	4	16	5	47	17	13	17
27	13	10	46	13	16	11	14	49	7	15	32	24	17	6	28	18	12	54
28	14	10	23	14	16	53	15	50	26	16	33	44	18	7	9	19	12	28
29	15	10	0	15	17	35	16	51	46	17	35	4	19	7	48	0	0	0
30	16	9	36	16	18	17	17	53	9	18	36	20	20	8	27	0	0	0
31	0	0	0	17	19	1	0	0	0	19	37	36	21	9	6	0	0	0

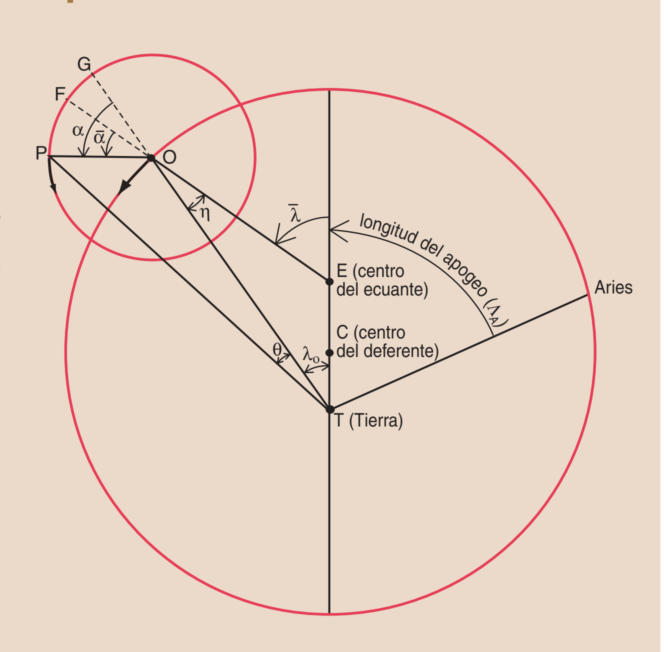
2. SEGUNDA MITAD (meses septiembre-febrero) del primer año del ciclo solar, que consta de cuatro años, en el *Almanach Perpetuum* (edición Leiria, 1496; facsímil publicado en Lisboa, 1986). Zacuto inicia el año el 1 de marzo y da la longitud verdadera del Sol (con aproximación de segundos) para cada día del ciclo.

JULIO SAMSO

Almanaque perpetuo y ciclos planetarios

En un modelo planetario ptolemaico el planeta (P) se desplaza, con movimiento uniforme, sobre un pequeño círculo (*epiciclo*) cuyo centro (O) se mueve, también con movimiento uniforme, sobre el círculo mayor (*deferente*). Para justificar el carácter no uniforme de los desplazamientos reales de los planetas, Ptolomeo introduce dos correcciones (*ecuaciones*): la primera se debe precisamente al movimiento del centro del epiciclo sobre el deferente (*ecuación del centro*, η) y la segunda al del planeta sobre su epiciclo (*ecuación de la anomalía*, θ). Un *año límite* consta de un número entero de años solares en los cuales el centro del epiciclo planetario realiza un número entero de revoluciones sobre su deferente y el planeta lleva a cabo un número entero de revoluciones sobre su epiciclo.

De esta manera, las posiciones planetarias se repetirán, en el segundo período, en las mismas fechas del año solar que en el primero. Basta, por ello, calcular un ciclo completo para cada planeta para obtener unas tablas con validez permanente: el usuario se limita a establecer qué número de orden tiene el año en curso dentro de cada ciclo para obtener, por lectura directa, la longitud de cada planeta en la fecha correspondiente.



PLANETA	AÑOS SOLARES	REVOLUCIONES DEL CENTRO DEL EPICICLO SOBRE EL DEFERENTE	REVOLUCIONES DEL PLANETA SOBRE SU EPICICLO
SATURNO	59	57	2
JUPITER	71	65	6
MARTE	79	37	42
VENUS	8	5	8
MERCURIO	46	145	46

de astrología de Salamanca, realizó una traducción castellana del *Ḥibbur* con la colaboración del propio Zacuto y se conserva, asimismo, una segunda traducción castellana anónima, que también se remonta a fines del siglo XV.

Las versiones árabes del "Almanach Perpetuum"

Hemos visto que Zacuto residió en Fez, Túnez, Damasco y Jerusalén entre c. 1496 y 1515. Su estancia en el mundo árabe no tuvo consecuencias inmediatas en lo que se refiere a la difusión de su almanaque. De hecho, la primera versión árabe de esta obra la llevó a cabo un médico judío, Mūsa Ŷalīnūs, en 1506-07, probablemente en Estambul, por encargo de un cierto ᶜAbd al-Raḥmān, que ocupaba el importante puesto de juez del ejército otomano y era, evidentemente, un musulmán. Esta versión parece haber tenido escaso éxito y hay que esperar a principios del siglo XVII para que se produzca una auténtica difusión de la obra.

Esta es la época en la que un exiliado morisco, llamado Aḥmad b. Qāsim al-Ḥaŷarī (1570-después de 1640), llevó a cabo su traducción árabe del *Almanaque*. Había éste abandonado España en 1599 y llegó a Marrakech, en donde se convirtió en el intérprete de español del sultán Mawlāy Zaydān al-Manṣūr (m. 1627) y de sus dos hijos los sultanes Abū Marwān ᶜAbd al-Malik b. Zaydān (1627-1630) y al-Walīd b. Zaydān (1630-1635). No sabemos exactamente en qué momento de su vida llevó a cabo su traducción al árabe de los cánones de José Vizinho, pero está claro que no fue su única traducción ya que, después de julio de 1634, al-Ḥaŷarī abandonó su carrera político-administrativa y se instaló en Salé, en donde se dedicó a traducir textos religiosos árabes al castellano para que pudieran ser utilizados por moriscos que desconocían el árabe.

Del mismo modo, en una fecha indeterminada, al-Ḥaŷarī partió de Salé con el fin de realizar la peregrinación a La Meca y, en el retorno de este viaje, estaba en Túnez en septiembre 1637, donde se en-

JULIO SAMSO

contró con otro morisco llamado al-Ra'īs Ibrāhīm b. Aḥmad b. Gānim Arribas. Este personaje había sido artillero naval en naves españolas, había viajado a América y era el autor de un tratado de artillería, escrito en castellano, que al-Ḥaŷarī tradujo, en 1638, al árabe con el título *Kitāb al-^{c}izz wa-l-raf^{c}a wa-l-manāfi^{c} li-l-muŷāhidīn fī sabīl Allāh bi-l-madāfi^{c}* ("Gloria, honor y provecho que encontrarán en los cañones aquellos que combaten en el camino de Dios").

El "Almanach Perpetuum" en el Magrib

La traducción de al-Ḥaŷarī se conserva en varios manuscritos y atrajo la atención de muchos eruditos magribíes, dando lugar a una serie de comentarios y resúmenes, fechados entre la segunda mitad del siglo XVII y el XVIII, que se interesaban por los procedimientos de cálculo de longitudes y latitudes planetarias mediante el uso de ciclos. Esta tradición se mantenía aún viva en la segunda mitad del siglo XIX ya que sabemos que Abū Isḥāq Ibrāhīm b. Muḥammad al-Tādilī al-Ribāṭī (m. 1894) estudió uno de los capítulos del *Almanaque* de Zacuto con su maestro Muḥammad al-Raṭal, médico y astrónomo de Rabat. Esto tiene un evidente interés en cuanto implica la introducción indirecta, en el mundo árabe, de las *Tablas Alfonsíes* y constituye un excelente ejemplo de una ciencia sin fronteras, resultado de una colaboración —no simultánea pero sí consecutiva— de sabios musulmanes y judíos y, en menor grado, cristianos. La difusión y las referencias internas de estos manuscritos demuestran claramente que la obra de Zacuto se difundió en Fez y Marrakech, así como en el norte de Marruecos (Ceuta, Tánger, Asila, Alcazarquivir).

Resulta interesante llamar la atención sobre la problemática que planteó la identificación de los autores de la obra (Abraham Zacuto y José Vizinho) como consecuencia de las dificultades que tuvieron los comentaristas magribíes a la hora de interpretar el *explicit* de los cánones castellanos del *Almanach Perpetuum*, en el que leemos lo siguiente:

> "Aquí se acaba la reçela [cánones, Ar. *risāla*] et las tablas trasladadas de abrayco en latin et de latin en noestro vulgar romançe per mestre jusepe vezino deçipolo del actor de las tablas".

Este pasaje plantea la evidente dificultad, para un lector árabe, de identificar el *latín* como lengua distinta del *romance*, así como la de entender qué significa *romance*. De ese modo se justifica que el colofón de un manuscrito de Rabat explique, en un árabe bastante incorrecto y que puede ser mal interpretado con facilidad, que el texto original "fue traducido del Hebreo al Latín *en* lengua romance por el maestro José que era discípulo del autor de las tablas". Esta confusión resulta aún más acentuada en el *explicit* del manuscrito de El Cairo, en el que se elimina toda referencia a la versión castellana y se identifica latín con romance, afirmando que el latín es la lengua no-árabe (*aljamía*) de España. Otro manuscrito de Rabat añade más confusión al identificar *Rumanṣ* con el "siervecito de Dios" (^{c}Ubayd Allāh) Aḥmad b. Qāsim al-Ḥaŷarī. Un lector de otro manuscrito de Rabat añade leña al fuego al considerar, en una glosa marginal, que *Rumanṣ* es el nombre del autor de las tablas y que se trata de un cristiano y no del judío Abraham Zacuto. Por otra parte, *Rumanṣ* es también el maestro Yūsuf al-Andalusī que, sin duda, es nuestro José Vizinho.

La confusión se acentúa en la recensión del *Almanaque* elaborada por Sīdī ^{c}Abd al-Karīm Agbāl, quien trabaja en el norte de Marruecos en fecha imprecisa, pero que debe situarse entre la segunda mitad del siglo XVII y fines del XVIII. Este autor convierte al misterioso cristiano *Rumanṣ* en un mero copista de la obra, mientras que el antes citado Yūsuf al-Andalusī sería el primer traductor de la misma al árabe y habría realizado su versión en Marrakech. Este pasaje llevó a ciertos eruditos a creer en la existencia de dos traducciones árabes diferentes de nuestra obra: la de al-Ḥaŷarī y la del imaginario Yūsuf al-Andalusī.

Finalmente, a fines del siglo XVIII, otro autor de una recensión del *Almanaque*, Muḥammad al-Mu^{c}ṭī confundirá a Zacuto con José Vizinho, ya que hablará de los "cánones de las tablas de Yūsuf [no Abraham] al-Isra'īlī al-Salamankī, conocido como Zakūt". El resultado es, pues, un embrollo notable en el que, a veces, Zacuto aparece como un cristiano y, otras, José Vizinho se convierte en un traductor musulmán denominado Yūsuf al-Andalusī. La cristianización de Zacuto se debe, en parte, al hecho de que el *Almanaque* utiliza el calendario juliano y la era cristiana, lo que llevará a los manuscritos de la Biblioteca Ambrosiana de Milán y de la Biblioteca Vaticana (de los que hablaré enseguida) a titular el *Almanaque* como "Tablas astronómicas cristianas" o "Tablas astronómicas del cristiano".

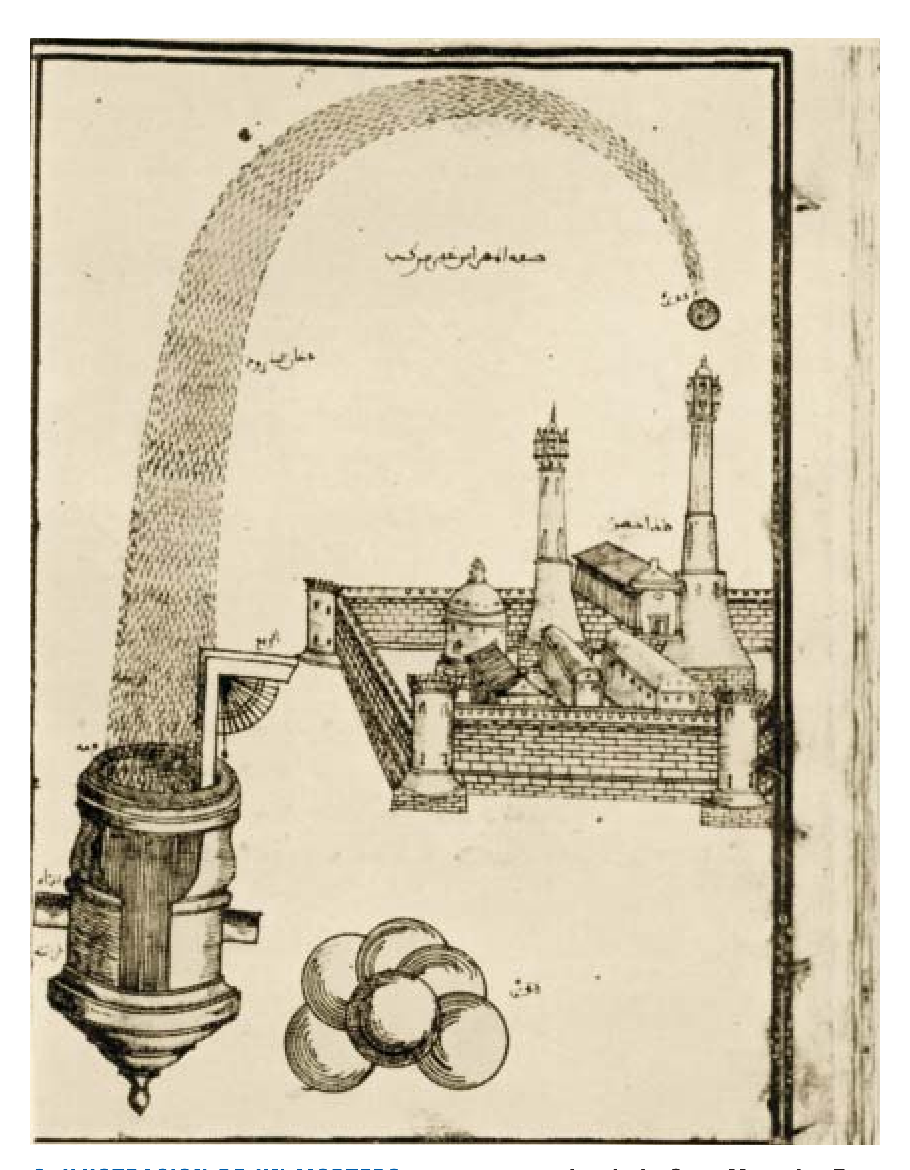
Difusión oriental del "Almanaque": Egipto y el Yemen

Un manuscrito magribí, al menos, llegó hasta Egipto (se conserva en la Biblioteca Nacional de El Cairo), donde fue adquirido por un astrónomo egipcio en 1823. Contiene una nota marginal que da prueba de su uso en Argel y otra que apunta a que pudo ser utilizado por un astrónomo yemení. De hecho, su difusión en el Yemen está bien documentada por otros dos manuscritos de la Biblioteca Ambrosiana de Milán y de la Biblioteca Vaticana. Un personaje con nombre otomano, Muḥammad b. Aḥmad agā Arḍ-rūmī (=Erzerūmī), aparece como copista (en 1675) del manuscrito ambrosiano y pretende haber copiado del manuscrito autógrafo de al-Ḥaŷarī. Esta referencia no deja de ser curiosa, ya que la mayor parte del manuscrito está escrita con letra yemení (lo que llama la atención en un copista con nombre otomano), pero un cierto número de folios aparecen con letra magribí; está claro, por otra parte, que los dos copistas (yemení y ma-

gribí) debieron de trabajar en colaboración ya que, en algunos casos, en un mismo folio aparecen las dos grafías en sus dos caras.

Además, este manuscrito lleva marcas de un propietario conocido: el astrónomo egipcio Yūsuf b. Yūsuf al-Maḥallī, cuya presencia en el Yemen está documentada entre 1730 y 1734. Es posible, también, que el mismo Yūsuf al-Maḥallī fuese el responsable de la introducción del *Almanaque* en el Yemen que debió traer desde El Cairo. Este personaje compiló unas efemérides astronómicas para el año solar 1733-1734, que dedicó al sultán al-Manṣūr Abū-l-ᶜAbbās Ḥusayn, y debieron interesarle los métodos de cálculo simplificados que le ofrecía la obra de Zacuto.

Sospecho, por otra parte, que Yūsuf al-Maḥallī está, de algún modo, relacionado con la otra copia yemení conservada en el manuscrito vaticano. Esta copia está llena de cálculos de posiciones planetarias para distintos años comprendidos, muy especialmente, entre 1715 y 1734 y parece claro que el usuario estaba intentando controlar la precisión que podía obtenerse con el *Almanaque* utilizando, en la mayoría de los casos, otras tablas astronómicas y, en dos ocasiones, auténticas observaciones. Una de estas últimas es claramente anterior a la época en que se utilizaba la copia vaticana, lo que me lleva a pensar que el autor de la nota está utilizando datos tomados de una fuente que es, por lo menos, un siglo anterior.



3. ILUSTRACION DE UN MORTERO en un manuscrito de la Gran Mezquita Zaytūna, conservado en la Biblioteca Nacional de Túnez, que contiene el tratado de artillería escrito en castellano por el morisco Ibrāhīm b. Gānim Arribas y traducido al árabe por al-Ḥaŷarī en Túnez c.1637-38.

Conclusiones

Las dos traducciones árabes del *Almanach Perpetuum* constituyen uno de los escasos ejemplos —no el único— en los que se manifiesta un cierto interés del mundo árabo-islámico por la tradición científica europea de la época del Renacimiento y de la Revolución Científica.

Hace ya años que, al leer una serie de catálogos de colecciones de manuscritos de la Biblioteca Nacional de Túnez, me sorprendió encontrar numerosas referencias a traducciones árabes de Paracelso. Del mismo modo, la lectura de un voluminoso repertorio biobibliográfico de astrónomos otomanos [*véase* INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2002, págs. 80-83] me ha hecho descubrir versiones árabes y turcas de las tablas astronómicas de Jacques Cassini (1677-1756), de Joseph-Jerôme Lalande (1732-1807) y de la *Théorie de la lune* (S. Petersburgo, 1752) de Alexis-Claude Clairaut (1713-1765).

Las dos traducciones del *Almanach Perpetuum* surgen, con un siglo de distancia, en los dos extremos del Mediterráneo: en el siglo XVI en Estambul y, a principios del XVII, en Marruecos. Esta segunda versión, la de al-Ḥaŷarī, es la que, sin duda, conoció un éxito mayor difundiéndose desde Marruecos hasta Egipto y, desde allí, hasta el Yemen en donde, como hemos visto, fue analizada críticamente en la primera mitad del siglo XVIII.

Hay que situar esta labor de al-Ḥaŷarī en el marco de la difusión de la cultura española y europea en el norte de Africa, como consecuencia de la emigración y, sobre todo, de la expulsión de los moriscos españoles hacia el Magrib a principios del siglo XVII. Esta difusión tuvo, en general, escasas consecuencias en el terreno de la

UN ASTRONOMO YEMENI INTENTA CONTROLAR LAS POSICIONES CALCULADAS CON EL ALMANAQUE PERPETUO

El manuscrito vaticano registra una ocultación de Júpiter por Marte al alba del 31 de diciembre de 1637 y nos da las longitudes eclípticas de ambos planetas (sin duda calculadas, no observadas) que pueden controlarse con las que se obtienen con el cálculo retrospectivo de un programa de ordenador (E. Z. Cosmos), basado en conocimientos actuales, para las cinco de la mañana de la fecha citada en Ṣanᶜā':

Longitud de Júpiter: 211º 24' 14'' (rec. 211º 36' 16'')
Longitud de Marte: 211º 15' 10'' (rec. 211º 49' 27'')

Al mismo tiempo señala que no parecía haber diferencia alguna entre las latitudes de ambos planetas. En este caso no nos da una estimación numérica de las latitudes. Pero podemos comprobar, utilizando el mismo E. Z. Cosmos, que la diferencia de latitudes era mínima:

Júpiter: 1º 16' 37''
Marte: 1º 18' 58''

La precisión del cálculo es notable y, claramente, *no* está utilizando el *Almanaque*, que da resultados mucho peores. Algo similar sucede con el otro ejemplo: una ocultación de Saturno por la Luna durante la noche del 4 de mayo de 1722. Según la nota del manuscrito, ambos astros estaban a 17º de Sagitario (257º) y se nos dice que su altura sobre el horizonte era de 52º y que, en aquel momento, la altura de la estrella Antares era de 48º y la de Arturo de 52º. El año 1722 se ajusta a las fechas para las que tenemos bien documentado el uso de este manuscrito por parte de un lector anónimo (¿Yūsuf al-Maḥallī?) y el hecho de que los valores numéricos que ofrece se expresen con la precisión de un grado hace pensar que se trata de datos obtenidos en una auténtica observación; para ésta se utilizó algún tipo de instrumento de medida no telescópico. Sus valores son muy buenos, tal como podemos comprobar con el recálculo para la fecha antes citada a las 2 de la mañana en Ṣanᶜā':

OBJETO	LONGITUD	LATITUD	ALTURA
SATURNO	257º 3'	1º 41'	53º 3'
LUNA	257º 12'	0º 55'	52º 16'
ANTARES	—	—	48º 7'
ARTURO	—	—	51º 38'

Tampoco en este caso parece que nuestro usuario anónimo haya utilizado el *Almanaque*, que no es tan preciso para principios del siglo XVIII. El problema, sin duda, le preocupó notablemente y le llevó a redactar un nuevo prólogo en el que señalaba que había intentado ajustar las posiciones calculadas con el *Almanaque* y sólo lo había conseguido para el Sol y la Luna. En el caso de estos dos astros, da ejemplos de cálculo (aquí con el *Almanaque*) de su longitud para el 25 de noviembre de 1734, que corresponde al día de la conjunción Sol-Luna, en los que, tras ciertas correcciones que no justifica, obtiene los resultados siguientes (entre paréntesis los valores recalculados con E. Z. Cosmos):

Sol: 242º 57' 57'' (242º 56' 31'')
Luna: 242º 30' (241º 56' 32'')

Parece, pues, claro que nuestro anónimo usuario está utilizando el *Almanaque* de forma muy crítica y reflexiva y que trata de obtener resultados que se ajusten al máximo a la realidad.

ciencia y de la técnica, razón por la cual las figuras de al-Ḥaŷarī y de su compañero el morisco Ibrāhīm b. Gānim Arribas adquieren un especial relieve por ser los autores del primer tratado de artillería escrito en árabe. Resulta una auténtica lástima que esta labor traductora no fuera continuada de forma sistemática y no se aplicara a obras científicas europeas que se encontraran más al día a principios del siglo XVII: pensemos que, en el momento en el que al-Ḥaŷarī realiza su versión, el *Almanach Perpetuum* era ya una obra claramente pasada de moda.

Digamos, por último, que el *Almanaque* y su versión árabe constituyen un excelente ejemplo que muestra que la ciencia no conoce fronteras religiosas ni culturales, aunque sí lingüísticas, razón por la cual resulta tan importante la labor de los traductores. En efecto, en esta obra,

se puede observar la existencia de una serie de estratos que se superponen a lo largo de un proceso de formación que dura más de veinte siglos: los "años-límite" descubiertos por los babilonios, seguidos por una adaptación de los mismos a la estructura del almanaque realizada por un astrónomo helenístico hacia el siglo II de nuestra era. La obra griega fue adaptada y puesta al día en el siglo XI por un musulmán andalusí, Azarquiel, y la misma técnica fue, de nuevo, utilizada a fines del siglo XV por un judío, Zacuto, quien utilizó como base las *Tablas Alfonsíes*, elaboradas por dos astrónomos judíos al servicio de un rey cristiano, quienes, por su parte, se encontraban muy influidos por las tablas de otro astrónomo musulmán de la segunda mitad del siglo IX, al-Bāttanī. Los materiales así reelaborados son traducidos al árabe y ejercen una influencia notable hasta fines del siglo XVIII e incluso más tarde. Se trata, pues, de un buen ejemplo de cooperación —a lo largo de la historia— tanto intercultural como interreligiosa.

4. MANUSCRITO de la Biblioteca Vaticana árabe 963 que contiene una copia yemení de la versión árabe del *Almanach Perpetuum* de Zacuto realizada por al-Ḥaŷarī. La ilustración de arriba (folio 13v) corresponde al comienzo de los cánones de Zacuto y Vizinho. La inferior (folio 8v) es una nota anónima en la que se describe la observación de una conjunción de la Luna y Saturno el 13 de Raŷab de 1134 Hégira/4 de mayo (gregoriano) de 1722 de J.C.

JULIO SAMSO

Bibliografía complementaria

"Una versión árabe resumida del Almanach Perpetuum de Zacuto". Juan Vernet, en *Estudios sobre Historia de la Ciencia Medieval*; Bellaterra, Barcelona, 1979.

Mathematical Astronomy in Medieval Yemen. A Biobibliographical Survey. David A. King. American Research Center in Egypt. Undena Publications; Malibu, 1983.

Almanach Perpetuum de Abraham Zacuto. Luís de Albuquerque, edición facsímil. Leiria, 1496; Lisboa, 1986.

Aḥmad ibn Qāsim al-Ḥajari, Kitāb Nāṣir al-Dīn ᶜalā 'l-Qawm al-Kāfirīn (The Supporter of Religion against the Infidel). P. S. van Koningsveld, Q. al-Samarral, y G. A. Wiegers. C.S.I.C. y A.E.C.I.; Madrid, 1997.

Astronomy in the Iberian Peninsula: Abraham Zacut and the Transition from Manuscript to Print. José Chabás y Bernard R. Goldstein, en *Transactions of the American Philosophical Society*, vol. 90, lám. 2; Philadelphia, 2000.

1. LAURA McGINNIS depende de un fármaco huérfano llamado Cystagon para el tratamiento de su cistinosis, enfermedad rara en la que el aminoácido cistina puede crecer hasta niveles destructivos de órganos. El Cystagon puede costar más de 7000 euros por año. La niña lo ingiere por una sonda estomacal, pero puede también mezclarse con la comida.







2. DANIELLE BARCKETT, de siete años de edad (*izquierda y arriba*) padece tirosinemia de tipo 1 hereditaria, deficiencia enzimática capaz de causar la muerte por destrucción del hígado y los riñones. Sale adelante gracias al tratamiento con Orfadin, que cuesta hasta 88.000 euros por año, si bien debe guardar un régimen alimenticio especial.



Reacción ante los fármacos huérfanos

El Decreto de Medicamentos Huérfanos de 1983 debía incentivar el desarrollo por la industria privada de fármacos necesarios, pero no lucrativos, para el tratamiento de patologías raras. Así ha sido, mas no sin provocar controversias

Thomas Maeder

En junio de 1989 Amgen, modesta firma dedicada a la biotecnología en Thousand Oaks, California, consiguió la aprobación de la Agencia de Fármacos y Alimentos (FDA) de EE.UU. para comercializar su primer producto, la epoetina alfa (Epogen), un tratamiento de la anemia que acompaña al fallo renal en su fase terminal. Dado que entonces no había muchos pacientes en esa situación —sólo unos 78.000— no parecía probable que Amgen lograse ni siquiera recuperar los costes del desarrollo del fármaco. Pero la aprobación de la FDA le permitía aspirar a recibir los incentivos establecidos por el Decreto de Fármacos Huérfanos (no patrocinados). Tal Decreto, un código normativo puesto en vigor en 1983, otorga beneficios a las empresas que desarrollen tratamientos para enfermedades muy poco frecuentes. De otro modo, nadie patrocinaría fármacos con un campo de aplicación tan reducido, y éstos se quedarían "huérfanos" de apoyo económico tras el examen de la FDA.

Una vez en el mercado, el Epogen demostró ser útil para otros fines más corrientes: regenerar glóbulos rojos en la sangre de pacientes que han perdido médula ósea por haber sido medicados contra el sida o tratados con quimioterapia para combatir el cáncer, y reducir la necesidad de transfusiones en las operaciones quirúrgicas. No tuvo que pasar mucho tiempo para que la compañía comenzara a obtener pingües beneficios de este fármaco. La ira cundió entre los legisladores y las asociaciones de consumidores, que acusaban a Amgen y otras firmas de haber explotado la generosidad del gobierno para enriquecerse. En 2001, Epogen y Procrit —versión este último de la epoetina alfa elaborada por Ortho Biotech en Raritan, Nueva Jersey— figuraban en sexto y séptimo

EN SENTIDO HORARIO, DESDE ARRIBA A LA IZQUIERDA: MARY ANN CHASTAIN *AP Photo;* ALIAS; PETER MURPHY; FRANK FILECCIA; PETER MURPHY

lugar entre los fármacos más vendidos en EE.UU.; entre los dos daban más de 5000 millones de euros de beneficios al año. Ante semejante éxito, la opinión pública comenzó a recelar de que se hubiera tomado el Decreto de Fármacos Huérfanos por un decreto de promoción de la biotecnología. ¿No se debería hacer algo para contener posibles abusos en el futuro?

Una mirada atrás

Antes de 1983, aunque ya se habían descubierto tratamientos para enfermedades raras, los laboratorios farmacéuticos no solían prestarse a su fabricación. Si bien un total de 25 millones de estadounidenses, una cifra enorme, padecía estas enfermedades, el mercado correspondiente no era atractivo por estar fraccionado entre más de 6000 subgrupos de dolencias que podían afectar desde unos pocos hasta doscientos mil pacientes. Los costes de desarrollo de los fármacos son exorbitantes (los laboratorios sostienen que cuesta 800 millones de euros comercializar un nuevo medicamento). Por ello las grandes empresas se han concentrado en productos de alto consumo, sobre todo los que tratan afecciones crónicas comunes, como la hipertensión, la depresión o la artritis.

Al final del decenio de 1970, los pacientes por su cuenta y las organizaciones de voluntariado sanitario empezaron a reclamar una legislación que fomentara el desarrollo de unas terapias necesarias, ya identificadas por la investigación básica aunque no disponibles en el mercado. Cierta compañía, por ejemplo, desechó los planes de producción de pimozida para el síndrome de Tourette, pese a ser el único fármaco que podía aliviar a un gran número de afectados. Igualmente se abandonaron la penicilamina aplicable a la enfermedad de Wilson, el 5-hidroxitriptófano para tratamiento de la mioclonía, el gamma-hidroxibutirato para la narcolepsia, el valproato sódico para algunas formas de epilepsia y la cisteamina para tratar niños afectados de cistinosis, cuando su coste resultó superior a lo que prometían sus mezquinas expectativas de ventas. Los pacientes tuvieron que importarlos clandestinamente, elaborarlos con recetas caseras ilegales o sencillamente resignarse a su privación. El reto consistía en incentivar a la poderosa industria farmacéutica para atender necesidades desesperadas y, en suma, convertir pérdidas en beneficios. En palabras de Henry A. Waxman, “los fármacos no patrocinados son como huérfanos, niños sin padres, y requieren un esfuerzo especial”.

La primera legislación aplicada a este tipo de fármacos fracasó porque carecía de los necesarios incentivos económicos, si bien atrajo la atención de la industria, del gobierno y del público sobre el problema, e hizo intervenir a las asociaciones de defensa de los pacientes.



3. LOS ACTORES Jack Klugman y Robert Ito declaran ante un Congreso de ficción en un episodio de la serie de televisión *Quincy, médico forense*, sobre la carencia de tratamientos para enfermedades raras. A los cinco días de emitirse el episodio, Klugman compareció ante el Congreso real para apoyar la aprobación del Decreto de Fármacos Huérfanos de 1983, el cual ofrece incentivos a los laboratorios farmacéuticos.

EVERETT COLLECTION

Resumen/*Fármacos huérfanos*

- Fármacos huérfanos son aquellos que tienen un mercado tan limitado, que no los fabricaría ningún laboratorio privado con ánimo de lucro. La Agencia de Fármacos y Alimentos de EE.UU. considera huérfano el aplicable a menos de 200.000 personas.
- El Decreto de 1983 ofrece incentivos para que los laboratorios farmacéuticos y compañías de biotecnología desarrollen medicinas para enfermedades raras. En él se establecen reducciones de impuestos y siete años de exclusividad de mercado para las empresas que deseen producir un fármaco huérfano.
- Algunos fármacos huérfanos —especialmente la epoetina alfa, que crea glóbulos rojos en la sangre— se han convertido en pingües negocios, lo que induce a cuestionar el abuso del Decreto de Fármacos Huérfanos por parte de los laboratorios.
- Pero sus defensores sostienen que el Decreto ha sido muy útil: hay 229 medicamentos en el mercado que tratan un total de 11 millones de pacientes, en su mayoría afectados por enfermedades graves o de riesgo mortal.

Uno de los sucesos que más influyeron fue un curioso caso en el que la vida imita al arte: el actor Jack Klugman, que interpretaba el papel protagonista en la serie televisiva *Quincy, médico forense*, se inspiró en un artículo de prensa sobre los apuros de un paciente del síndrome de Tourette y otro con mioclonía para crear un episodio dedicado a enfermedades raras. En la ficción, Quincy denunciaba ante el Congreso la vergonzosa carencia de medicamentos para tales dolencias. Más tarde, el actor Klugman tuvo que repetir ese mismo testimonio ante el Congreso real. Por último, en enero de 1983, el presidente Reagan convirtió en ley el Decreto sobre fármacos huérfanos. Sufrió después varias modificaciones y actualmente permite a los laboratorios farmacéuticos deducir el 50 por ciento de los impuestos sobre todos los costos de pruebas clínicas, los exime de pagar la tasa denominada de usuario (en torno a 533.000 euros), que suele imponer la FDA a los patrocinadores de fármacos, e impide que en el plazo de siete años se autorice a otras firmas a producir el mismo fármaco.

El Decreto obedecía a la necesidad de ofrecer incentivos económicos a las empresas y de conceder mayor libertad a los laboratorios para idear estudios que demuestren la seguridad y la eficacia del fármaco candidato. El conjunto normal de pruebas clínicas humanas puede durar años e involucrar a miles de pacientes en multitud de lugares. Por otra parte, el número de personas afectadas por una enfermedad rara puede ser menor que el de los participantes en los ensayos clínicos habituales, por cuya razón no es posible seguir los protocolos de prueba ordinarios. Por ejemplo, en EE.UU. sólo había 12 niños que padecían deficiencia en adenosín deaminasa (ADA), causa de la enfermedad de inmunodeficiencia combinada severa (SCID), cuando cierta firma estaba desarrollando un fármaco para su tratamiento. Similarmente, la sacarosidasa destinada a un trastorno enzimático congénito (deficiencia en sacarasa-isomaltasa) se aprobó con sólo dos ensayos sobre 41 pacientes en total.

Por esas circunstancias tan especiales, la relación de la FDA con las firmas dedicadas a fármacos huérfanos es bastante familiar, frente al trato más formalista que mantiene con los patrocinadores de medicamentos. Marlene E. Haffner —directora de la Oficina de Desarrollo de Productos Huérfanos de la FDA— afirma que su cometido consiste tanto en regular los nuevos fármacos contra trastornos extraños como

Acaparar el mercado

La cláusula de exclusividad de mercado durante siete años ha resultado decisiva para la eficacia del decreto. La FDA únicamente puede aprobar la producción del mismo fármaco por un eventual competidor si demuestra que es “clínicamente superior”: más seguro, más eficaz o más fácil de tomar. El decreto original consideraba huérfanos los fármacos que no tuvieran razonables expectativas de recuperar sus costes de desarrollo a través de las ventas en los Estados Unidos. Pero la complejidad de estos análisis de proyección económica disuadió a las compañías que contaban con fármacos aspirantes a tal condición. La respuesta inicial del sector farmacéutico fue desalentadora. Una enmienda de 1984 aclaró las cosas al estipular que todo fármaco destinado a enfermedades que afecten a menos de 200.000 ciudadanos de EE.UU. se reputaría no lucrativo y, por lo tanto, huérfano.

GLOSARIO DE TRASTORNOS RAROS

CISTINOSIS: acumulación del aminoácido cistina, factor constitutivo de las proteínas, que provoca lesión orgánica (sobre todo en riñones y ojos). Afecta a unas 400 personas en EE.UU.

DEFICIENCIA EN SACARASA-ISOMALTASA: carencia de las enzimas sacarasa e isomaltasa, que conduce a la incapacidad de asimilar azúcares y almidones. Afecta al 0,2 por ciento de los norteamericanos.

ENFERMEDAD DE GAUCHER: acumulación, especialmente en la médula ósea, el bazo, los pulmones y el hígado, de un compuesto graso producido por la carencia de glucocerebrosidasa. Afecta a menos de 10.000 personas en todo el mundo y se caracteriza por crecimiento anómalo del hígado y el bazo, anemia, bajos niveles de plaquetas coagulantes y malformaciones esqueléticas.

ENFERMEDAD DE WILSON: acumulación de cobre en los tejidos, en particular en hígado, cerebro y córneas. Puede producir fallo hepático y disfunción del sistema nervioso central en unas 30.000 personas de todo el mundo.

MIOCLONIA: trastorno nervioso caracterizado por contracciones y relajaciones musculares repentinas e involuntarias. Lo sufren nueve de cada 100.000 individuos.

PURPURA TROMBOTICA TROMBOCITOPENICA: recuentos plaquetarios anormalmente bajos y menor supervivencia de los glóbulos rojos; ocasiona una fuerte tendencia a hemorragias en la piel o membranas mucosas. Existen de 15.000 a 22.000 pacientes en EE.UU.

SINDROME DE TOURETTE: tics vocales y musculares que se manifiestan por movimientos involuntarios de extremidades y rostro, acompañado por sonidos incontrolados o palabras socialmente incorrectas. Lo padecen unos 100.000 estadounidenses.

TIROSINEMIA DE TIPO 1 HEREDITARIA: deficiencia en la enzima que degrada, en condiciones normales, al aminoácido tiroxina. Puede producir graves alteraciones hepáticas y renales en los 100 individuos que la padecen en EE.UU.

en ayudar a situar en el mercado los que sean seguros y eficaces. Para conseguirlo, administra un programa de subvenciones en ayuda de las investigaciones sobre fármacos que aspiren a la condición de huérfanos. Desde 1983 la FDA ha concedido 370 subvenciones de este tipo; totalizan más de 150 millones de euros. Asimismo, apoya a los patrocinadores de estos fármacos para que conciban pruebas clínicas con significado estadístico, tarea propensa a errores en las enfermedades inusuales.

Huérfanos agradecidos

La investigación de enfermedades raras a veces da resultados de valor insospechado. Este efecto, en sí muy recomendable, también puede caer como llovido del cielo a los laboratorios farmacéuticos y, a su vez, provocar el enojo de otros.

Las enfermedades inusuales a menudo provienen de un defecto genético específico; una mutación, por ejemplo. Sus síntomas revelan entonces la función normal de un gen determinado. Pensemos en la deficiencia en alfa-1-antitripsina, que produce enfisema en los jóvenes; situación trágica para quienes sufren esa mutación, permite, sin embargo, estudiar las causas de la enfermedad sin que puedan achacarse al tabaco ni a la edad. En el caso de la púrpura trombótica trombocitopénica, los trombos sanguíneos creados por la ausencia de una enzima que en condiciones normales escinde una proteína de la sangre puede descubrir un factor capaz de contribuir al ataque cardíaco y al accidente cerebrovascular.

Por supuesto, las enfermedades raras y los medicamentos huérfanos han sido inestimables para la investigación farmacéutica aplicada, aunque nadie había previsto que el Decreto de Fármacos Huérfanos acabaría imprimiendo un fuerte impulso a la naciente industria biotecnológica. A diferencia de los laboratorios tradicionales, que en su mayoría fabrican medicinas a partir de pequeñas moléculas, las firmas de biotecnología de aquel momento solían ser de muy reciente creación y se concentraban en la producción de las proteínas necesarias para sustituir las que faltaban o eran defectuosas en las personas afectadas. Fabricaban las proteínas utilizando la técnica del ADN recombinante, introducida en

LOS 10 FARMACOS BIOTECNOLOGICOS MAS VENDIDOS Y SU SITUACION COMO FARMACOS HUERFANOS

ORDEN	NOMBRE COMERCIAL	PRINCIPIO ACTIVO	INDICACION PRINCIPAL	VENTAS MUNDIALES EN 2001 (millones de dólares)	FECHA ORIGINAL DE APROBACION EN EE.UU.
1	Epogen Procrit Eprex	Epoetina alfa	Anemia	5588 $	Junio 1989
2	Intron A PEG-Intron Rebetron	Interferón alfa 2b	Hepatitis C	1447 $	Noviembre 1988
3	Neupogen	Filgastrin	Neutropenia (escasez de glóbulos blancos)	1300 $	Febrero 1991
4	Humulina	Insulina humana	Diabetes	1061 $	Octubre 1982
5	Avonex	Interferón-beta 1a	Esclerosis múltiple	972 $	Mayo 1996
6	Rituxan	Rituximab	Linfoma no Hodgkin	819 $	Noviembre 1997
7	Protropin Nutropin Genotropin Humatrope	Somatropina	Trastornos del crecimiento	771 $	Octubre 1985
8	Enbrel	Etanercept	Artritis	762 $	Noviembre 1998
9	Remicade	Infliximab	Enfermedad de Crohn	721 $	Agosto 1998
10	Synagis	Palivizumab	Enfermedad respiratoria pediátrica	516 $	Junio1998

Aprobado originalmente como fármaco huérfano (filas 1, 5, 6, 7, 9)

No aprobado originalmente como fármaco huérfano pero reconocido ahora como tal para uno o varios estados parciales de enfermedad (filas 2, 3, 8)

Nunca designado como fármaco huérfano (filas 4, 10)

Fuentes: Nature Reviews: Drug Discovery, *vol. 1, n.º 11, pág. 846; noviembre 2002, FDA*

los años setenta. Para ello se aislaba o clonaba el gen que codifica una proteína humana, y se insertaba éste en bacterias o células de mamíferos cultivadas en laboratorio para producir la proteína en grandes cantidades.

Numerosas enfermedades raras resultaron muy adecuadas para ser tratadas con productos biotecnológicos. Hay trastornos hereditarios graves o letales, tales como las deficiencias de una enzima originadas por un defecto en la codificación genética de la enzima, que a la vez son muy infrecuentes y potencialmente tratables con proteínas de sustitución sintetizadas por recombinación. La fabricación de estas moléculas por los laboratorios farmacéuticos tradicionales es difícil y costosa, y tampoco suele ser fácil extraerlas de tejidos humanos o animales. Cuando el Decreto entró en vigor, motivó a las pequeñas empresas de biotecnología a elaborar fármacos a partir de estas proteínas recombinantes, aunque no pudieran patentarlos —preocupación muy especial en los primeros tiempos de la biotecnología, cuando la Oficina de Patentes y Marcas de EE.UU. todavía luchaba por encontrar la mejor protección posible a las moléculas que se producían naturalmente.

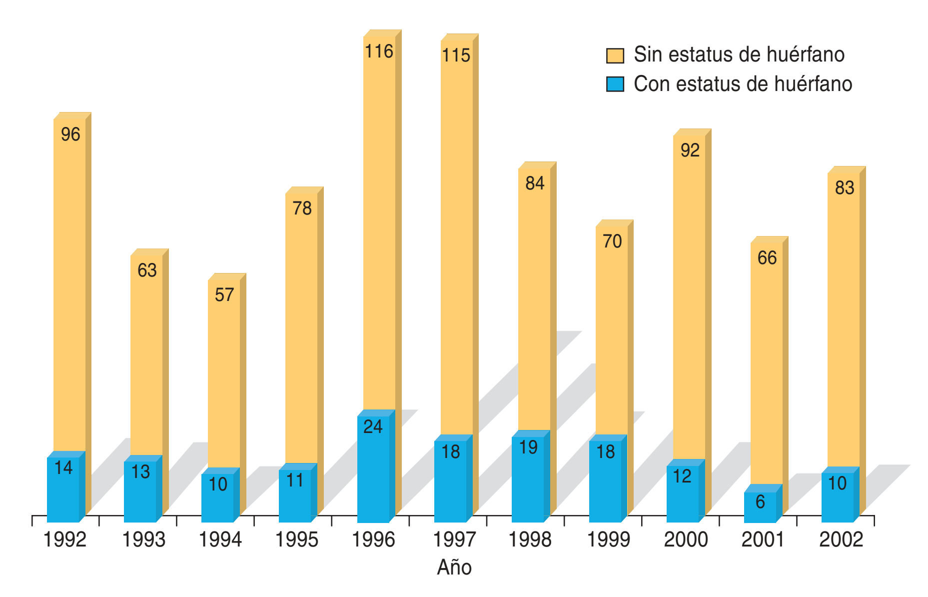
Un estudio reciente del Centro Tufts para Estudio del Desarrollo de Fármacos reveló que, entre 1983 y 1992, la industria biotecnológica consiguió el 19 por ciento de todas las aprobaciones de fármacos huérfanos, mientras que un 76 por ciento fue a parar a los laboratorios farmacéuticos. En 2001 la biotecnología se llevaba ya el 41 por ciento del total. De los diez fármacos biotecnológicos más vendidos en 2001, cinco fueron originalmente aprobados en calidad de huérfanos, y otros tres obtuvieron esta designación como suplemento a su aplicación normal, con lo que sus fabricantes gozaron de siete años de exclusividad en el mercado. Por descontado, los productos huérfanos más lucrativos ayudaron al lanzamiento de varias de las firmas biotecnológicas principales, entre ellas Amgen y Genentech.

Como ejemplo notable de una técnica aplicada a fármacos huérfanos que se ha extendido a un uso más generalizado cabe señalar la polietilenglicación, el proceso de añadir a una proteína una substancia cerosa llamada polietilenglicol (PEG), que hace que el fármaco tarde más en eliminarse del torrente sanguíneo y le enmascara contra el ataque del sistema inmunitario. La polietilenglicación comenzó a aplicarse en 1990 en el fármaco huérfano Adagen de Enzon para el tratamiento del SCID-ADA. Aunque sólo unas pocas docenas de niños en todo el mundo sufren este trastorno, la técnica de polietilenglicación se utiliza ahora en el PEG-Intron, dentro de un tratamiento combinado de la hepatitis C; tiene, además, enormes posibilidades en otras aplicaciones terapéuticas.

Aparte de imprevistos golpes de suerte, es posible hacer rentables los medicamentos huérfanos. En 1988, Lars-Uno Larsson fundó en Estocolmo la Swedish Orphan International, convencido de que el Decreto de Fármacos Huérfanos permitía obtener ganancias modestas pero suficientes en medicamentos concebidos para enfermedades raras. Con filiales hoy en todo el mundo, Swedish Orphan ha desarrollado una serie de productos e inspirado la creación de compañías similares. “Los expertos de mercado se asombran de que pueda hacerse dinero con productos de 10 millones de euros”, observa John Bullion, que trabajó en capital riesgo y hoy dirige Orphan Medical, compañía de Minnesota que cuenta con una docena de productos huérfanos aprobados. “Bueno, sí que pueden obtenerse buenas ganancias con productos de 10 millones, pero se necesita fabricar varios de ellos”, concluye.

Las personas afectadas de enfermedades raras suelen ser tratadas por un reducido grupo de médicos expertos, que se reúnen en grupos para aconsejar e instruir a los pacientes, compartir información y presionar para que avance la investigación de sus patologías. Esta estrategia combinada hace que sea relativamente fácil y económico encontrar pacientes que participen en pruebas clínicas y adquieran los medicamentos. Según un reciente análisis de la industria, el desarrollo de un fármaco para una enfermedad rara cuesta la cuarta parte de lo que necesita un medicamento para la hipertensión: sus costes de comercialización anuales sólo ascienden a la séptima parte.

PRODUCTOS FARMACEUTICOS Y BIOLOGICOS APROBADOS POR LA FDA



4. LOS FARMACOS HUERFANOS representan un 17 por ciento de todos los productos farmacéuticos y biológicos que se han aprobado en EE.UU. en los últimos 10 años.

JOHNNY JOHNSON; FUENTE: FDA

Objetos buenos para grupos reducidos

En buena medida, la Exención de Aparatos Humanitarios viene a ser para el instrumental médico lo que el Decreto de Fármacos Huérfanos es para los medicamentos

Los productos médicos regulados por la FDA no sólo comprenden medicamentos sino una enorme variedad de *objetos*. El Centro de Aparatos y Sanidad Radiológica (CDRH) de la FDA regula miles de aparatos médicos que van desde los depresores de lengua y batas quirúrgicas hasta corazones artificiales y máquinas para tomografía computerizada.

El CDRH posee una "exención de aparatos personalizados" que suprime muchos requisitos a aparatos dirigidos a satisfacer necesidades específicas de un reducido grupo de pacientes o los deseos que impone un determinado médico o dentista por su personal idiosincrasia. Pero esta exención se ha limitado tradicionalmente a una media docena de aparatos por año. Por eso cuando creció la demanda de un tubo especial —llamado "stent"— que es el único instrumento que puede resolver la obstrucción de la vejiga en los fetos, la FDA no supo qué hacer.

Las obstrucciones de la vejiga afectan aproximadamente a 200 fetos cada año en EE.UU. y pueden provocar la muerte, si no se eliminan y pasa la orina del feto al líquido amniótico. Durante decenios, las gestantes tenían que soportar que cada cierto tiempo se extrajera orina de la vejiga del feto con unas largas agujas. En 1982 el suministrador médico Cook Urological de Spencer, Indiana, empezó a vender un diminuto tubo en espiral que se introduce a modo de sonda para que la orina atraviese la obstrucción. Al principio, la compañía fabricó dicho tubo, el "stent", como aparato personalizado para pacientes individuales que se vendía a precio de coste. Pero cuando el número de tales aparatos llegó a 680, la CDRH dejó ya de considerarlos personalizados, y para abarcar aparatos como el stent fetal de Cook Harrison creó en 1996 la Exención de Aparatos Humanitarios.

Dicha exención se limita a aparatos para el diagnóstico o tratamiento de patologías que afecten a menos de 4000 personas en EE.UU., y —a diferencia del Decreto de Fármacos Huérfanos— prohíbe que los fabricantes obtengan beneficio alguno. En compensación, solamente se exige a las empresas demostrar que sus aparatos son seguros, no que funcionen, y se autoriza su venta al tiempo que se realizan pruebas clínicas de su eficacia. Pero en seis años no se han aprobado más que 28 aparatos en régimen de exención, lo que hace preguntarse si no se debería revocar la prohibición para estimular la comercialización de tales productos.



TUBO SONDA FETAL (*aumentado*) que se introduce en el tracto urinario de un feto para remediar la obstrucción de la vejiga. Su éxito movió a la FDA a establecer la Exención de Aparatos Humanitarios como estímulo para la fabricación de tales aparatos.

COOK UROLOGICAL

Huérfanos ricos

Pero la legislación sobre fármacos huérfanos ha permitido abusos muy notorios: no sólo ha sido campeona la epoetina alfa de Amgen. En su primera presentación, la hormona del crecimiento humano (hGH) de Genentech y la AZT de GlaxoSmithKline, aprobadas para trastornos raros (la deficiencia en hGH y el sida, respectivamente), más tarde proporcionaron ganancias astronómicas cuando los médicos empezaron a prescribir hGH para niños de baja estatura y se disparó la epidemia de sida. Ciertos críticos sostienen que los fármacos huérfanos lucrativos no necesitan más ayudas y que se deberían confiscar los beneficios conseguidos gracias al Decreto. La Unión Europea recientemente promulgó una ley que despojaría de la condición de huérfano a todo medicamento que al cabo de cinco años se convierta en "extraordinariamente lucrativo". Pero los legisladores estadounidenses, sometidos a la presión de la industria farmacéutica nacional, han rechazado repetidamente medidas análogas. Es demasiado pronto para afirmar si la ley europea evitará que los laboratorios abusen de la designación de huérfano; el control sobre los precios de los medicamentos que establecen los planes de sanidad nacionales hará también que sea difícil evaluar la repercusión de la ley.

Un caso notable de la relación de precio a beneficios se afirma ser la imiglucerasa (Cerezyme) de la casa Genzyme. Este fármaco —terapia de sustitución enzimática para la enfermedad de Gaucher, que sufren 2000 personas en EE.UU.— es el medicamento más caro del mundo. De acuerdo con los datos disponibles, Genzyme obtiene de su venta unas ganancias anuales de 500.000 millones de euros, cobrando a cada paciente entre 100.000 y 400.000 euros al año, según sea niño o adulto. Y la compañía no redujo el precio cuando pasó de obtener la substancia por extracción de la placenta humana a producirla por el método de recombinación, menos costoso.

Para defender sus desorbitados precios, los laboratorios farmacéu-

El autor

THOMAS MAEDER es asesor de estrategias científicas del hospital clínico de la Universidad de Georgetown. Entre sus libros merece destacarse *Adverse Reactions*, sobre la legislación de los fármacos vista a través del fatal trastorno en la sangre que provocaba el cloranfenicol.

ticos aducen su necesidad de supervivencia y de financiar las investigaciones futuras. Y señalan que, en algunos casos, podrían cobrar precios mucho más elevados. Rare Disease Therapeutics, afiliada a Swedish Orphan en Tennessee, ha fijado el precio de Orfadin, medicamento recientemente aprobado para la tirosinemia de tipo 1 hereditaria, en 80.000 euros menos que el coste de un trasplante de hígado, la única terapia alternativa para ese trastorno. (Dentro de la compañía se dice que el precio se ha determinado a través del cálculo de los costes.) Esta firma, que no cotiza en Bolsa y, por tanto, no está sometida a presiones bursátiles, podría fácilmente haber ganado el doble con un fármaco del que depende la vida de los niños que sufren esa dolencia.

Esto es un flaco consuelo para los pacientes. Afortunadamente, sin embargo, no parece que nadie afectado por una enfermedad rara no haya podido obtener un fármaco aprobado por la FDA por falta de dinero. La mayoría de los laboratorios de fármacos huérfanos tienen programas formales o informales para dar medicamentos gratuitos a pacientes indigentes, pero casi nunca divulgan el número de los admitidos o los requisitos exigidos para optar a tal beneficio. También existen planes de la administración para ayudar a quienes padecen diversos trastornos raros, en especial algunos hemofílicos que han de gastarse más de 100.000 euros por año en factor VIII, una proteína de la coagulación sanguínea.

Nadie ha sido capaz de ofrecer una solución aceptable al problema de los beneficios indecorosos. En último término, el elevado coste de los medicamentos huérfanos no es sino una parte del magno problema que es el alto precio de los fármacos en general. La propia FDA no tiene autoridad para fijar los precios, ni poderes para insistir en que deben reducirse los costes de los fármacos huérfanos o de cualesquiera otros. Solamente tiene control sobre la aplicación a que se destina cada fármaco. Lo más que puede hacer para influir en los beneficios es decidir si un compuesto con el que se pretende tratar una enfermedad rara va probablemente a tener un mercado muy limitado y, por ello, merece la protección del Decreto.

Cortar en rebanadas

Además de respetar la condición de huérfano a los fármacos que acaban por tener un mercado inusitadamente amplio, el Decreto ha servido para favorecer las líneas básicas corporativas de otro modo que, también, ha sido blanco de críticas. La FDA permite a los laboratorios farmacéuticos seccionar las enfermedades en "estados parciales con razonable entidad médica", denominación que no define con claridad. La oficina de productos huérfanos de la Agencia ha procurado combatir este "corte en rebanadas", pero ciertas firmas siguen intentando definir un estado o manifestación de enfermedad como una entidad distinta, acreedora a los beneficios de fármaco huérfano si afecta a menos de 200.000 personas.

Es inevitable que el asunto se complique al aparecer la farmacogenómica y la medicina personalizada: la posibilidad de dirigir los tratamientos con mayor precisión y, por tanto, con mayor seguridad y eficacia, a grupos de población e incluso a individuos, determinando a través de los perfiles genéticos quiénes van a responder mejor a un medicamento dado y sufrir menos efectos secundarios. Esto podría favorecer a los pacientes, pero también pone en un brete a la industria farmacéutica, que hasta ahora se apoya en las ventas masivas de fármacos idénticos a grupos de pacientes muy poco diferenciados. En la próxima década habrá multitud de afecciones que desde el punto de vista diagnóstico y terapéutico admitan seccionarse en partes que satisfagan el requisito mínimo de "razonable entidad médica". Tal vez la sociedad encuentre entonces que un gran número o la totalidad de los fármacos son huérfanos, y los políticos tendrán que volver a plantearse cómo estimular la investigación de enfermedades verdaderamente raras.

A los veinte años de haberse promulgado, muchos creen que el Decreto sobre Fármacos Huérfanos ha sobrepasado sus expectativas originales. Durante el decenio que precedió a su aparición, se comercializaron 34 productos huérfanos, 10 de ellos desarrollados por la industria privada y los 24 restantes merced a financiación federal. En los veinte años siguientes han entrado en el mercado 229 fármacos huérfanos que tratan un total de 11 millones de pacientes, en su mayoría con enfermedades graves o de riesgo mortal. La FDA ha concedido esa condición a cerca de 1000 medicamentos más.

Da una medida más subjetiva del éxito del Decreto el que lo hayan copiado casi al pie de la letra la Unión Europea, Australia, Japón y otros países asiáticos. Y el Departamento de Seguridad Interior de EE.UU. llega a considerar que es un modelo de cómo orientar los esfuerzos hacia el desarrollo de vacunas y antídotos contra posibles agentes de la guerra biológica.

Sin duda, el Decreto no es perfecto, pero en una economía de libre mercado constituye el mejor modelo ideado hasta el momento para garantizar que los que sufren enfermedades raras puedan conseguir los tratamientos que desesperadamente necesitan.

Bibliografía complementaria

TWO DECADES OF ORPHAN PRODUCT DEVELOPMENT. Marlene E. Haffner, Janet Whitley y Marie Moses en *Nature Reviews: Drug Discovery*, volumen 1, n.º 10, páginas 821-825; octubre de 2002.

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Martillazos

Los martillos, las espadas empuñadas a dos manos —los viejos montantes— y las raquetas de tenis actúan por percusión. Quien los emplea desea transmitir con el máximo rendimiento la energía que les comunica, pero evitando los contragolpes desagradables en la mano o a la altura de la muñeca. Vamos a examinar de qué modo la manera en que están concebidos estos artefactos mejora sus cualidades y la comodidad con que se los maneja.

Cuando dos cuerpos sólidos colisionan, se deforman, durante un lapso muy breve, en las proximidades de la zona de contacto, y luego se separan con unas velocidades muy diferentes de las que tenían antes del choque. Durante el impacto, las fuerzas debidas a las deformaciones son considerables y muy superiores a los pesos; así, cuando un palo de golf golpea la pelota, la fuerza es de 5000 newton, o sea, el peso de una masa de media tonelada.

A nuestra escala, es difícil determinar con precisión esas fuerzas de contacto y, por tanto, saber lo que pasa durante el choque. Pero, gracias al gran Isaac Newton, sí sabemos del resultado final algo fundamental: que durante una colisión se conserva la cantidad de movimiento (el producto de la masa por la velocidad de cada cuerpo del sistema). Así, tras el choque de un martillo contra un clavo, la cantidad de movimiento del martillo se transfiere al clavo, y éste se hinca. La cantidad de movimiento será la misma utilicemos un martillo de 200 gramos animado de una velocidad de 5 metros por segundo o un martillo de un kilogramo animado de una velocidad de un metro por segundo: valdrá un kilogramo-metro por segundo. En los dos casos, la fuerza que permite hincar el clavo es la misma. Pero el resultado final podría ser diferente, ya que la cantidad de movimiento no es la única magnitud que cuenta en una colisión.

La energía aportada tiene un papel esencial en las deformaciones que sufren los objetos. Estos son de naturaleza diversa: tras chocar, dos bolas de billar siguen iguales, mientras que un objeto golpeado con una masa rara vez queda intacto; se deforma, se trocea. Cuando los cuerpos son perfectamente elásticos, toda la energía de impacto se recupera tras el choque bajo la forma de energía cinética; si no lo son, una porción importante de la energía se disipará en forma de calor o de deformaciones irreversibles y ya no se conservará la suma de las energías cinéticas de los cuerpos.

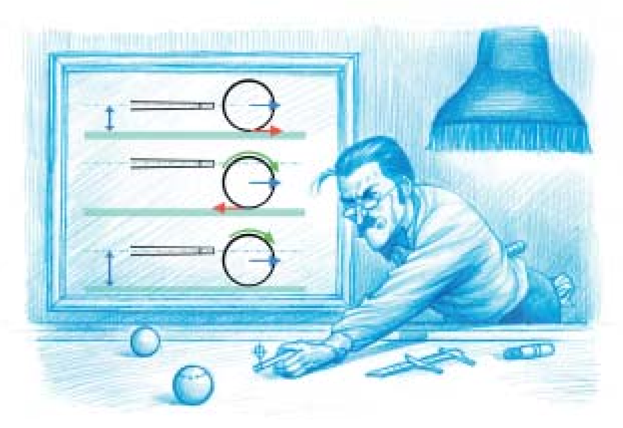
La energía cinética es igual a la mitad del cociente del cuadrado de la cantidad de movimiento por la masa. En el ejemplo anterior, la energía cinética del martillo de 200 gramos es de 2,5 joule, mientras que la del martillo de un kilogramo vale medio joule. Si no rebota, la energía aportada por el martillo ligero quintuplicará la comunicada por el pesado. Por ello, para colocar un clavo es preferible elegir un martillo cuanto más pesado mejor: manejado mas lentamente que uno ligero, no sólo el gesto será más preciso, sino que, además, disminuirá el riesgo de que se doble el clavo, pues la energía perdida será menor.

Al contrario, si se desea producir el máximo daño, si se quiere, digamos, romper una piedra, preferiremos un martillo ligero dotado de un movimiento rápido: los martillos de geólogo nunca son muy pesados, y tienen mangos más largos que los de bricolaje; lo que permite imprimir a la cabeza una velocidad mayor. Hay un espectacular número circense: el artista, tendido sobre el suelo, hace que un ayudante o un espectador parta un bloque de piedra de cien kilogramos colocado sobre su pecho; para ello deberá golpear violentamente la piedra con una masa de diez kilogramos. Tras el choque, la cantidad de movimiento de la masa pasa a la piedra. Como ésta es diez veces más pesada que la masa que la golpea, su velocidad será diez veces menor, y los nueve décimos de la energía inicial de la masa servirán para romper el bloque de



BRUNO VACARO

1. *Para romper una piedra, sirve mejor un martillo ligero de mango largo que un martillo pesado de mango corto*



2. *El impacto en el centro de percusión hace que la bola ruede sin deslizar; rebotará en la banda a esa misma altura*

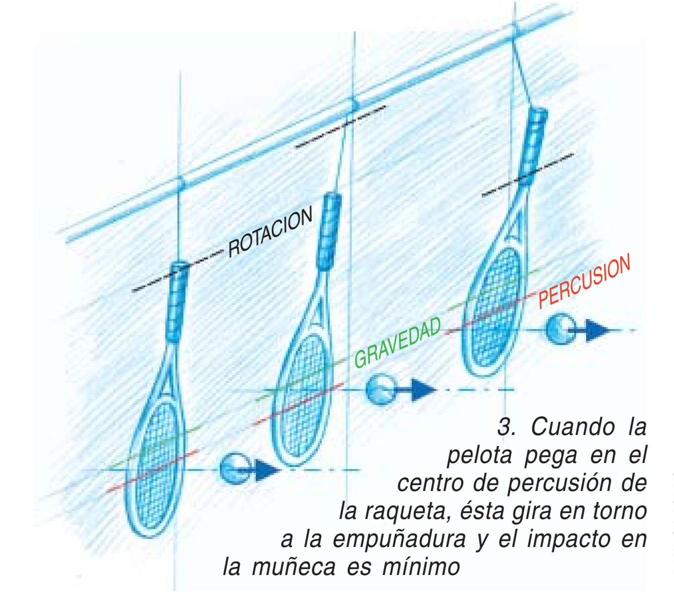
piedra. La energía que encaja el artista es diez veces menor que si la piedra no estuviera y, por tanto, el número no es tan peligroso como parece.

Elegido el útil de percusión, determinemos el lugar donde hay que golpear. Para ello, examinemos el ejemplo del billar, donde el taco comunica a la bola un movimiento de traslación y de rotación. Cuando el jugador golpea la bola a la altura del centro de gravedad, no comunica a la misma movimiento de rotación alguno. La bola empieza a avanzar deslizándose sobre la mesa; ese deslizamiento debe evitarse, pues disipa energía a causa del rozamiento. El jugador golpea la bola más arriba, para comunicar a la bola, mediante el impacto, un movimiento de rotación. Si el choque tiene lugar casi en la cima de la bola, ésta girará demasiado rápido respecto a su traslación, y así también se disipará energía por rozamiento. La solución está en golpear en un punto llamado centro de percusión, situado a una altura que vale siete quintos del radio de la bola: la velocidad de rotación impartida a la bola está entonces perfectamente ajustada a la velocidad de traslación, de modo que la bola rueda sin deslizarse y así minimiza la pérdida de energía. Esta es la razón de que las bandas de la mesa de billar tengan dicha altura. El choque contra una banda tiene lugar en el centro de percusión; así las velocidades de traslación y rotación cambian simultáneamente, de modo que la bola rebotada vuelva a rodar sin deslizar.

Para los objetos de forma sencilla, como una bola o una puerta, la posición del centro de percusión puede calcularse tal como se expone en los cursos de mecánica general. Para una raqueta de tenis, es más fácil establecerla experimentalmente. Se suspende la raqueta verticalmente mediante un hilo sujeto a la empuñadura. Si se la golpea en su centro de percusión, el movimiento inicial será una rotación en torno al centro de la empuñadura, el punto de donde se la sujeta. Si la percusión tiene lugar cerca del centro de gravedad, o sea, más cerca de la empuñadura, la velocidad de rotación comunicada a la raqueta será menor y la empuñadura adquirirá una velocidad en el sentido de la percusión. En cambio, si la percusión ocurre más lejos del centro de gravedad, la velocidad de rotación será mayor y la empuñadura se desplazará en sentido contrario.

Cuando la raqueta se halla en la mano del jugador, éste siente a veces con violencia el movimiento comunicado a la empuñadura. Para que no se perciba una sacudida, es indispensable que la pelota golpee la raqueta en el centro de percusión, y por razones de eficacia del cordaje, la pelota debe incidir en el centro de éste. Por consiguiente, hay que construir la raqueta de modo que el centro de percusión se halle en el centro del cordaje. Para que ambos “centros” coincidan, algunos fabricantes lastran el extremo de la empuñadura emplomándolo. Otros prefieren agrandar el cordaje cerca de la empuñadura.

Un tope de puerta funciona análogamente. Su objeto es detener la rotación de una puerta cuando gira en torno a sus goznes. Para ello, el tope debe colocarse a la altura del centro de percusión de la puerta. En este caso la masa no se distribuye como en una bola



3. Cuando la pelota pega en el centro de percusión de la raqueta, ésta gira en torno a la empuñadura y el impacto en la muñeca es mínimo

de billar; por eso la posición del centro de percusión será diferente: el tope habrá que situarlo a una distancia de los goznes igual a dos tercios de la longitud de la puerta. Si se hace así, el tope sólo bastará para parar la puerta y los goznes no sufrirán esfuerzos excesivos: justo después del impacto, el eje de rotación de la puerta coincidirá con el eje de los goznes.

En cuanto a los objetos sujetos con la mano, si se los golpea en el centro de percusión, no se apreciará impacto alguno en la muñeca. Pero no siempre se tratará del lugar que resulte más práctico. En tal caso, será deseable desplazar del centro de percusión cambiando la distribución de la masa. Si la cabeza de un martillo es paralelepipédica, el centro de la cara donde tendrá lugar el impacto estará en el eje del centro de gravedad (la masa del mango es despreciable). Golpeando en ese punto, el choque con el clavo no tendrá ningún efecto en la rotación de la cabeza y la mano del operario recibirá un impulso del mango. El centro de percusión está más lejos de la mano que el centro de gravedad. Para que coincida con el centro de la cara del martillo, basta desplazar el centro de gravedad hacia el mango eliminando material de la zona del martillo más alejada de la mano. Por eso se bisela la cola del martillo, o lado opuesto a la cabeza.

En las espadas, hay que controlar a la vez la posición del centro de gravedad y del centro de percusión. Para que se las pueda manejar bien, el centro de gravedad debe estar cerca de la mano, lo que puede conseguirse recargando el pomo o aguzando la hoja hacia el extremo. Por otra parte, para que la espada no se escape de la mano a cada golpe, el contendiente debe golpear a su adversario a la altura del centro de percusión. Valeroso, mas no temerario, deseará que el centro de percusión esté lo más lejos posible a lo largo de la hoja. Los mercenarios suizos y alemanes del Renacimiento hallaron una solución original a esos inconvenientes: los montantes, o espadas de dos manos, estaban dotados de unas varillas laterales, los gavilanes, que prolongaban la guarnición. Decorativos y protectores, los gavilanes alejaban así el centro de percusión una veintena de centímetros respecto a las espadas del mismo tipo y lo situaban a 75 centímetros de la guarnición. Los lansquenetes resultaban así tanto más temibles.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M.R. Parrondo

La paradoja de Simpson

El pueblo de Calda se dividió hace tiempo en dos municipios, Calda la Vieja y Calda la Nueva. En las últimas elecciones se presentaron en ambos pueblos dos partidos, llamémoslos A y B, para no herir susceptibilidades. El partido A ganó en Calda la Vieja y el B en la Nueva, con el consiguiente disgusto de Arturo, líder comarcal del partido A, que siempre había triunfado en los dos pueblos. Nuestro líder se dispuso a analizar los escrutinios y a comparar los de los dos pueblos, para tratar de encontrar en qué sectores se habían perdido o ganado votos y las razones de la derrota en Calda la Nueva. La comparación parecía en principio sencilla, porque en los dos pueblos habían votado exactamente mil ciudadanos. Sin embargo, al político le esperaba alguna que otra sorpresa.

Arturo comenzó estudiando el voto masculino y el femenino. En Calda la Nueva, su partido había obtenido un 30 % del voto femenino y un 80 % del masculino. No estaba nada mal, a pesar de haber perdido. La sorpresa llegó cuando quiso comparar estos resultados con los del pueblo donde había ganado, Calda la Vieja. Allí sólo había obtenido el 20 % del voto femenino y el 75 % del voto masculino. En los dos sectores el porcentaje de votos en Calda la Nueva era superior al de Calda la Vieja. Sin embargo, en este último se había ganado y en el primero se había perdido. ¿Cómo es esto posible?

Nuestro líder político está siendo víctima de la llamada *paradoja de Simpson*, un fenómeno bastante conocido en estadística. Veamos, a partir de los votos obtenidos por el partido A en cada pueblo, cómo es posible que ocurra esta paradoja. En la siguiente tabla se muestran los votos de cada partido:

Partido A / Partido B	Mujeres	Hombres	Total
Calda la Nueva	210/490	240/60	450/550
Calda la Vieja	80/320	450/150	530/470

Como ya hemos dicho, el total de votos en cada pueblo es 1000. Arturo había calculado bien los porcentajes. En Calda la Nueva su partido había obtenido 210 de los 700 votos femeninos, es decir, un 30 %, y 240 de los 300 votos masculinos, es decir, un 80 %. A su vez, en Calda la Vieja habían obtenido 80 de 400 votos femeninos, es decir, un 20 %, y 450 de los 600 votos emitidos por hombres, es decir, un 75 %. La siguiente tabla resume estos porcentajes, que se pueden obtener inmediatamente de la tabla anterior:

Porcentaje de votos para el partido A	Mujeres	Hombres	Total
Calda la Nueva	30%	80%	45%
Calda la Vieja	20%	75%	53%

En esta tabla se encuentra la esencia de la paradoja. Los porcentajes por sectores son superiores en Calda la Nueva y, sin embargo, el total es inferior. Parece imposible que pueda ocurrir algo así, pero estos números son los que se obtienen del reparto de votos indicado en la primera tabla.

La razón de este extraño comportamiento estriba en que se están comparando porcentajes parciales de sectores que no tienen el mismo tamaño. Si escribimos una tabla con la participación en cada pueblo y en cada sector:

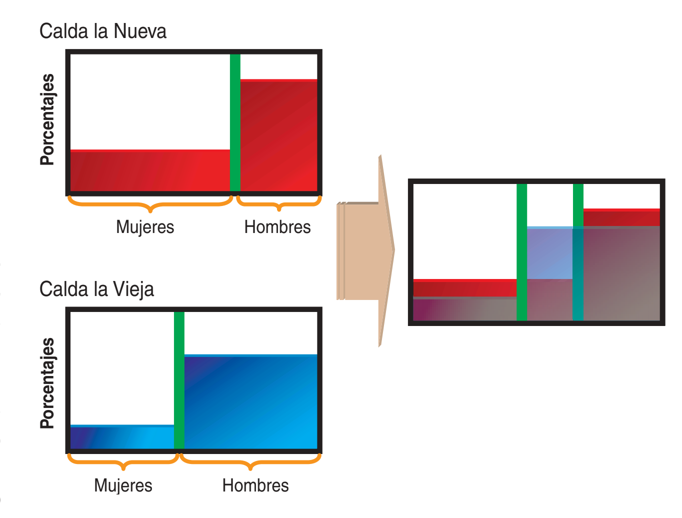
Participación	Mujeres	Hombres	Total
Calda la Nueva	700	300	1000
Calda la Vieja	400	600	1000

vemos que el voto femenino en Calda la Nueva ha sido muy superior al masculino, lo que ha hecho prevalecer su opción mayoritaria, que era el partido B. Por el contrario, en Calda la Vieja son los hombres los que han depositado más votos en la urna y, como lo han hecho en un alto porcentaje al partido A, ha sido éste el ganador.

La solución de la paradoja se hace aún más evidente en la representación gráfica de la figura. Los rectángulos representan el total de votos emitidos en cada pueblo. Separamos los femeninos de los masculinos con una línea verde vertical, y los que han sido para el partido A con líneas horizontales en cada sector (*rojas en Calda la Nueva y azules en la Vieja*). El porcentaje o fracción de votos en cada sector y en cada pueblo viene dado por la altura que alcanza la línea horizontal correspondiente, mientras que el porcentaje total en cada pueblo viene dado por el área coloreada.

La versión geométrica de la paradoja es que las líneas horizontales rojas pueden estar por encima de las azules y, sin embargo, el área roja puede ser *menor* que el área azul. Esto es perfectamente posible, como podemos ver en el tercer rectángulo que no es más que la superposición de los dos anteriores: el área azul posee un rectángulo entre las dos líneas verdes que puede compensar el exceso de área roja en los extre-

Representación gráfica de la paradoja de Simpson. Las líneas horizontales rojas están por encima de las azules, es decir, en cada sector, los porcentajes de votos al partido A son mayores en Calda la Nueva. Sin embargo, el área total azul es mayor que la roja, lo que equivale a que el porcentaje total de votos al partido A sea mayor en Calda la Vieja



mos. La representación gráfica ayuda también a encontrar conjuntos de datos en los que se dé la paradoja. Para ello el área del rectángulo azul tiene que ser grande y, por tanto, lo debe ser su base, que es la distancia entra las dos líneas verdes y su altura. Es decir, tienen que ser grandes tanto la diferencia entre los tamaños de los sectores en un pueblo y otro, como la diferencia entre los porcentajes de cada sector.

La paradoja de Simpson queda circunscrita al mundo de las curiosidades matemáticas. Puede darse en situaciones reales, como en la evaluación de terapias y fármacos, y nos advierte de que hay que interpretar con cuidado los datos estadísticos. El caso más conocido ocurrió en la Universidad de California en Berkeley. Para analizar si había algún tipo de discriminación de género, se realizó un estudio sobre el porcentaje de solicitudes de admisión rechazadas en los distintos departamentos. Los datos globales de la universidad indicaban que las mujeres eran rechazadas más frecuentemente que los hombres. Sin embargo, este sesgo se invertía en los datos de los departamentos, en donde la frecuencia de rechazo de los hombres era mayor. Se trataba de un nuevo caso de la paradoja de Simpson. La respuesta se encontraba en que hombres y mujeres no solicitaban la admisión en los departamentos de modo uniforme, sino que ellas lo hacían en mayor medida en los departamentos en donde era más difícil ser admitido.

Mark Fischetti

ANTENAS

Captar ondas

Pese a la televisión por cable y la radio por Internet, millones de personas dependen de las antenas para recibir las señales de televisión y de radio. Con la proliferación de la televisión por satélite, las radios portátiles, los teléfonos celulares y otros aparatos inalámbricos, hoy se utilizan las antenas más que nunca.

¿Por qué hay tal variedad de tamaños y formas de antenas? Para empezar, el tamaño lo impone el tipo de onda de radio que se deba captar; una onda entrante resuena en las mejores condiciones cuando la longitud de la antena es la mitad de la longitud de la onda. Como las ondas miden desde unos 5,5 m, es el caso de algunos canales de televisión, hasta los 33 o 17 cm de la telefonía móvil, una longitud de antena adecuada es crucial para la recepción.

También ayuda una orientación correcta. La parte eléctrica de las transmisiones de FM y TV está polarizada horizontalmente, por lo que la antena funciona mejor cuando yace en un plano horizontal. La polarización de las radioondas de AM es vertical. Sin embargo, la mayoría de las emisoras modernas emiten las ondas conforme a un patrón helicoidal que comprende ambas polarizaciones, con lo que las antenas dispuestas en planos diferentes pueden recibir la señal con la misma eficacia casi que las situadas en el plano óptimo. Ciertas configuraciones, las antenas de cuernos para TV por ejemplo, permiten además al usuario girar o graduar los elementos de la antena para reducir las interferencias.

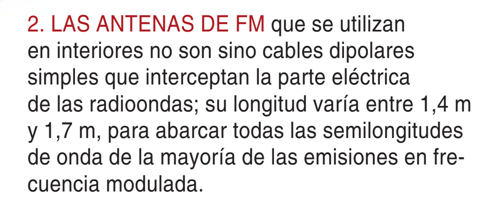
Las ondas de radio no tienen más complicaciones que su longitud y orientación. Una onda se limita a inducir un voltaje en la antena, por lo que muchas de las extrañas formas y artificios que se venden no aportan nada eléctricamente. Algunos modelos, como las antenas de televisión planas para interiores, se venden "por razones estéticas", observa Len Davi, de Retocan/Pensen (Nueva York).

Los ejemplos abundan. Durante un tiempo, se tendió a incrustar las antenas en los parabrisas de los automóviles; no funcionaban tan bien como las levantadas, pero los vehículos quedaban mejor así. ¿Y las espirales y aletas de algunas antenas de interior? No sirven de nada, comenta Britain.

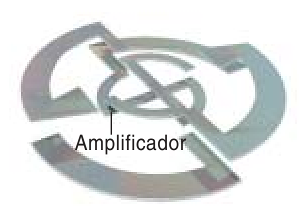
Un amplificador en la base de una antena aumenta los milivolt de la señal, pero en ocasiones se exagera la amplificación necesaria. "En la mayoría de las aplicaciones, sólo hay que amplificar de 12 a 14 decibelios", señala Kent Britain, de RDI. "Más no sirve de nada y hasta puede sobrecargar la electrónica. Un amplificador de 30 decibelios no ofrece ventaja alguna respecto a otro de 20 decibelios."



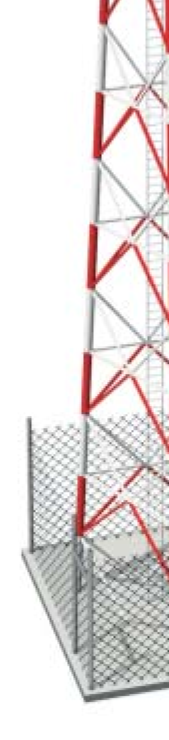
1. LAS ANTENAS DE AM suelen consistir en una bobina de conductor enrollada alrededor de una barra de ferrita, que capta la parte magnética de las ondas de 300 m de la modulación de amplitud (AM); su rendimiento es inferior al de las antenas dipolares, pero resultan más manejables que una antena de 150 metros de longitud.



2. LAS ANTENAS DE FM que se utilizan en interiores no son sino cables dipolares simples que interceptan la parte eléctrica de las radioondas; su longitud varía entre 1,4 m y 1,7 m, para abarcar todas las semilongitudes de onda de la mayoría de las emisiones en frecuencia modulada.



3. LAS ANTENAS DE TELEVISION DE ESTADO SOLIDO emplean pequeños amplificadores alimentados por corriente continua, acoplados a varios elementos angulares alojados dentro de un disco. Pequeñas y ligeras, suelen añadirse a los platos de la televisión por satélite, que no captan las emisoras locales.



JOHN MACNEILL

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **BUENOS CONSEJOS**: ¿Que tipo de antena y qué orientación optimizan la recepción de la televisión en casa? Si se remite una dirección cualquiera de Estados Unidos a www.antenaweb.org, responderá la base de datos de la Asociación de la Electrónica de Consumo.

➤ **SALTO DE FRECUENCIAS**: Con ciertos aparatos de elevadas prestaciones, desde teléfonos sin cable hasta radares militares, se recurre al espectro disperso (64 frecuencias, digamos, próximas a 900 megahertz); la emisión y recepción de señales se atienen a un patrón establecido, de manera que se minimicen las interferencias. Según la aplicación, la antena puede ser una varilla de siete u ocho milímetros o un cilindro de 60 centímetros de diámetro.

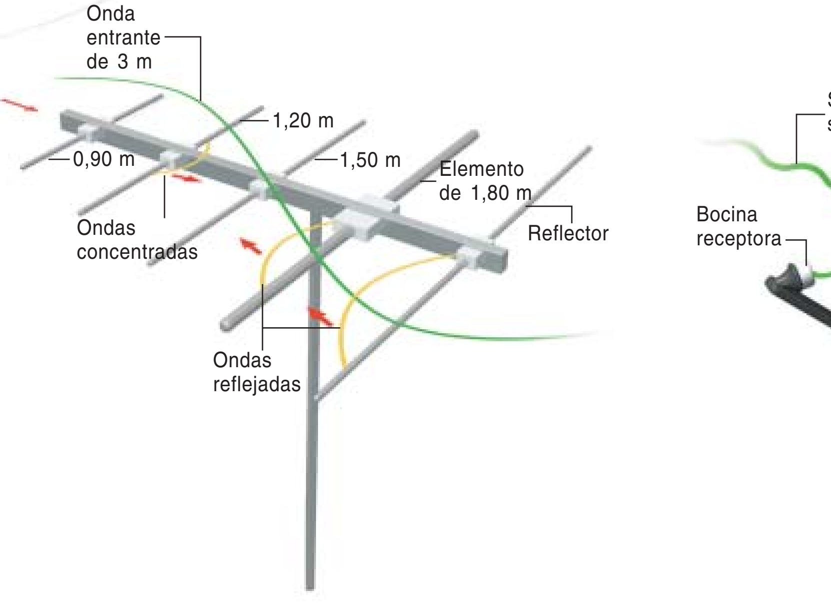
➤ **AUDIFONOS**: Los transmisores telefónicos envían el sonido a los teléfonos móviles mediante una modulación de impulsos (la señal se apaga y enciende). El ruido electrónico que ello causa es imperceptible al oído, pero los audífonos lo amplifican y se produce un zumbido molesto.

➤ **ONDAS HUMEDAS**: Las ondas terrestres emitidas por las torres de TV y radio tienen su alcance máximo cuando viajan por encima de agua o de terreno llano y húmedo, pues en ambos casos el índice de refracción es superior al de un terreno irregular o seco. Un aire muy húmedo, en suspensión cerca del suelo después de que haya llovido intensamente sobre una región muy extensa, puede canalizar las ondas a lo largo de centenares de kilómetros y posibilitar la sintonización de emisoras lejanas.



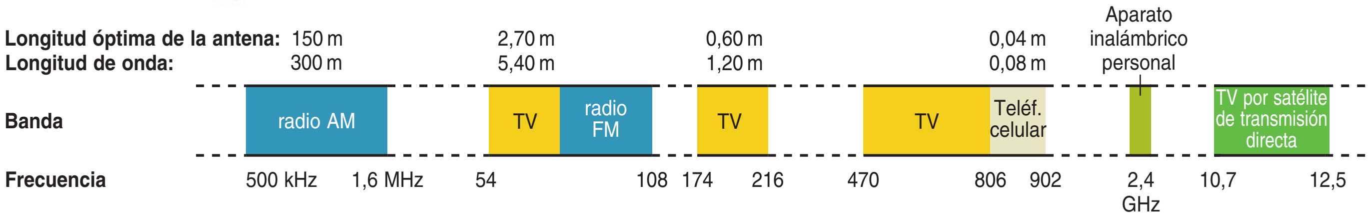
5. LAS ANTENAS DE CUERNOS pueden alargarse o acortarse para adaptarse a un cuarto, a la mitad o a toda la longitud de onda de cada canal televisivo. Su forma en V ofrece dos elementos que cabe orientar a distintas torres emisoras o inclinar para minimizar las interferencias de ondas que llegan desfasadas tras incidir sobre obstáculos.

4. LAS ANTENAS DE TEJADO DE TELEVISION optimizan la recepción de los canales empleando diferentes elementos. Un elemento de 1,5 m es el mejor para captar las ondas de 3 m. Los elementos de mayor longitud refuerzan la ganancia reflejando la onda; los de menor longitud contribuyen reemitiéndola.





6. LOS PLATOS DE LA TELEVISION POR SATELITE concentran las ondas de TV sobre un convertidor de bloqueo de bajo ruido situado en la bocina receptora. En los antiguos diseños parabólicos, la bocina y el armazón bloqueaban parte de las ondas y producían interferencias, reduciendo el rendimiento de la recepción hasta en un 50 a 55 por ciento. En los nuevos diseños descentrados, los componentes se disponen debajo del plato, con lo que el rendimiento sube hasta alrededor de un 80 por ciento.



7. REPARTE EL ESPECTRO DE RADIOFRECUENCIAS en EE.UU. la Comisión Federal de Comunicaciones. En la Comunidad Europea, existe una Autoridad Nacional de Regulación para cada país miembro. En el caso de España, la correspondiente ANR es la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT). Por lo general, la longitud óptima de una antena es la mitad de la longitud de onda de la frecuencia. Una antena de cuarto de onda es eficaz si se instala sobre un gran cuerpo de metal reflector, un automóvil por ejemplo. Estas longitudes resuenan con mayor rendimiento y transfieren más energía de la onda al receptor.

Química

prelavoisierana

TRANSMUTATIONS: ALCHEMY IN ART. SELECTED WORKS FROM THE EDDLEMAN AND FISHER COLLECTIONS AT THE CHEMICAL HERITAGE FOUNDATION, por Lawrence M. Principe y Lloyd DeWitt. Chemical Heritage Foundation; Philadelphia, 2002. **THE CAMBRIDGE HISTORY OF SCIENCE. VOLUME 4. EIGHTEENTH-CENTURY SCIENCE.** Dirigido por Roy Porter. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

GEORG ERNST STAHL (1659-1734). Dirigido por Dietrich von Engelhardt y Alfred Gierer. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; Halle 2000. **HERMAN BOERHAAVE (1668-1738). CALVINIST CHEMIST AND PHYSICIAN,** por Rina Knoeff. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen; Amsterdam, 2002.

AFFINITY, THAT ELUSIVE DREAM. A GENEALOGY OF THE CHEMICAL REVOLUTION, por Mi Gyung Kim. The MIT Press; Cambridge, 2003.

Entre los errores comunes de los manuales y resúmenes hay uno que afirma que la química empezó con Lavoisier. Antes, se remata el dislate, sólo había alquimia, otorgando a este término el sentido nebuloso de cuanto guarda relación con la magia y el embaucamiento. Muy otra es la apreciación que la historia de la ciencia ha venido fomentando (*Transmutations: Alchemy in Art*). Figuras decisivas en la creación moderna de la química, así Robert Boyle e Isaac Newton, pusieron resuelto empeño en la experimentación alquímica.

En su siglo XVII no había “alquimistas”, por un lado, y “químicos”, por otro: química y alquimia se entreveraban y confundían. Habrá que calzarse sus borceguíes para entenderlo mejor. Pensemos en el sueño por antonomasia del alquimista, la transmutación, es decir, la conversión de metales corrientes (plomo y estaño) en metales nobles (oro y plata). Comunes y nobles parecían compartir importantes propiedades; el brillo, por ejemplo. De esa y otras propiedades igualadoras dedujeron que constarían de los mismos ingredientes esenciales y variarían sólo en su diferente grado de pureza. Lo habían apuntado ya los árabes, que reducían los componentes últimos de los metales a *mercurio* y *azufre*. Ambos se combinaban en las entrañas de la tierra. Si había allí un exceso de mercurio —el principio fluido— se formaban estaño y plomo, que son los dos metales que se funden con mayor facilidad. Si predominaba el azufre —el principio seco e inflamable— se engendraban hierro y cobre, que son los dos metales más duros y de pronta combustión. Sólo cuando el mercurio muy puro y el azufre muy puro se mezclaban en las proporciones correctas se producía oro.

Si la naturaleza fabricaba oro, ¿por qué no remedarla en el laboratorio? Mas, ¿cómo obtener en días lo que a la tierra le costaba miles de años? Se precisaba una suerte de catalizador, un agente material de las transmutaciones. Le pusieron el nombre de piedra filosofal o elixir. Una pequeña cantidad de piedra filosofal, arrojada sobre un metal común fundido, “corregiría” el metal y lo transmutaría en oro. El propio Boyle, que fracasó en el intento, admitía que había químicos eximios capacitados para transmutar metales.

La alquimia tenía una vertiente aplicada a la medicina. Se denominó *iatroquímica* o *chemiatria*. La producción y el mercado de medicamentos constituían una actividad comercial importante en el siglo XVII. Desde el punto de vista teórico, comportaba el abandono del galenismo tradicional por las doctrinas de Paracelso, quien puso la química en el centro de su cosmología. Asociaba el universo entero (“macrocosmos”) a una inmensa vasija de destilación cuyos cambios asimilaba a las operaciones realizadas en el laboratorio; el cuerpo humano (“microcosmos”) guardaba, a su vez, una relación de paralelismo no sólo con el macrocosmos, sino también con los procesos químicos. En su senda, los paracelsistas, enemigos declarados de la medicina académica, propugnaban la sustitución de los simples vegetales por preparados químicos y el recurso terapéutico a los metales. No les faltaba razón a sus críticos cuando denunciaban el carácter tóxico del arsénico, antimonio o plomo. Pese a ello, las investigaciones químicas de la sangre, orina y otros fluidos corporales empedraron un camino sin retorno.

En puridad, la preparación de fármacos químicos, integrada en una manufactura más general, arrancaba de bastante atrás. El desarrollo económico de los siglos XVI y XVII va uncido a la expansión creciente de talleres donde se producían tinturas, sales y ácidos, metales y aleaciones, vidrios, gemas artificiales, pólvora, cordiales, perfumes e incluso pigmentos para los pintores que inmortalizaron el laboratorio del alquimista. Suele citarse el ejemplo de quien empezó siendo ayudante de laboratorio de Boyle, Ambrose Godfrey Hanckwitz, para abrir muy pronto su propia oficina en Londres, donde impulsó un lucrativo método de preparación y comercialización del fósforo. Con su monopolio amasó una fortuna extraordinaria. La empresa química que fundó en las postrimerías del siglo XVII perduró hasta 1917.

El proceso de destilación, crucial para la obtención de la mayoría de esos productos, recibió notables mejoras técnicas. Por destilación se preparaban los ácidos sulfúrico, nítrico y clorhídrico, necesarios para ensayar y separar metales preciosos. De la difusión del *ars destilatoria*, otro nombre de la química, se ocu-



1. El laboratorio del alquimista*, de David Teniers el joven*

paron numerosos manuales, donde aparecían ilustrados los aparatos empleados en su desempeño: la calabaza (una suerte de vasija grande), los alambiques y retortas. Para refinar y fundir metales a elevadas temperaturas se servían de crisoles. Por supuesto, la pieza principal de la estancia del químico alquimista correspondía al horno; con aperturas y cierres ingeniosos de chimeneas, y una aplicación inteligente del combustible, podían regular su calor con notable precisión.

La química, a principios de la centuria siguiente, se había convertido en disciplina formal, sancionada por las universidades (Leiden y Edimburgo, sobre todo) y las entidades académicas de prestigio, la Regia Sociedad de Londres y la Academia de Ciencias de París. Lo mismo en el capítulo dedicado a la química del espléndido volumen cuarto de la *The Cambridge History of Science*, recién incoada, que en la documentada monografía *Affinity*, *That Elusive Dream. A Genealogy of the Chemical Revolution*, de Mi Gyung Kim, se parte el siglo XVIII en dos mitades temáticas: química prelavoisierana y revolución de Lavoisier. Son dos momentos, reconocen los autores, sin solución de continuidad.

Rompe el primero con los supuestos hiatos entre el químico francés y sus predecesores. Innovaciones de Lavoisier que suelen cifrarse en las siguientes: teoría de la combustión, con el rechazo del "flogisto"; definición de elemento y método de análisis; reconocimiento del estado gaseoso de la materia, resaltando que las sustancias podían convertirse en gases por acción del calor, sin cambiar su naturaleza química; por último, conservación de la materia en el curso de su transformación química.

Pero hubo química antes de Lavoisier. A lo largo del siglo XVIII formaba un cuerpo de técnicas prácticas, instrumentos y materiales, que respondían a una textura teórica, vinculada a la filosofía de la materia, aunque carente de límites rígidos. Su tramado conceptual dependía de las tesis mecanicistas (formas corpusculares y movimientos específicos) o newtonianas (fuerzas de atracción específicas entre partículas). Empezaron por compendiarse las nociones básicas en tablas de "afinidades". Al tiempo que la introducción de nuevos fenómenos experimentales (calor y gases), y la exigencia de mediciones más precisas de las magnitudes químicas, instaron cambios significativos en la teoría y en la práctica de laboratorio, avanzada la centuria.

Aunque la filosofía mecanicista había rescatado el viejo concepto de átomo, éste no repercutió apenas en la praxis química. Sí prendió la ontología mecani-

cista, por ejemplo, para dar cuenta de las propiedades de los ácidos en el *Cours de chymie* (1675) de Nicholas Lemery, un texto determinante durante decenios. Lemery atribuía el sabor acre y la acción corrosiva de los ácidos a las partículas puntiformes, que penetraban en el interior de los poros de otros cuerpos. La filosofía mecanicista cedió el cetro a la corriente newtoniana, cuyo influjo en el dominio de la química fue más sutil y persistente. En la *Optica* Newton extendía a las reacciones químicas de sustitución o desplazamiento unas fuerzas microscópicas, análogas a la de la gravedad aunque de menor escala. Mencionó también la posibilidad de fuerzas de repulsión. Señalaba que la "fermentación" —por la cual entendía cualquier proceso que liberase "aire" a partir de los sólidos o líquidos— "parece ininteligible… sino es por fuerzas repulsivas". Ahí cifran algunos el origen de la química pneumática, que se ocupó de la liberación de fluidos aéreos y, de su proceso inverso, la fijación. Aplicando la doctrina newtoniana, Stephen Hales proclamaba, en *Vegetable Staticks* (1727), que: las fuerzas repulsivas responsables de la expansión del aire podían contrarrestarse por atracciones de intensidad suficiente por partículas de materia más pesada, en cuyo caso el aire persistiría "fijado".

De acuerdo con la doctrina newtoniana, las sustancias podían ordenarse en razón de la intensidad de su mutua atracción. Pero las afinidades químicas y su clasificación ordenada seguían un camino propio, cuyo mojón de partida lo esculpió, en 1718, Etienne François Geoffroy. Las 16 columnas de su "Tabla de las diferentes relaciones observadas entre substancias distintas" estaban encabezadas con símbolos de álcalis, ácidos y metales; aparecían a continuación los símbolos de las sustancias que podían formar combinaciones con ellas, en orden descendente de intensidad de la combinación. Geoffroy evitaba el empleo de las palabras "atracción", con sus connotaciones newtonianas, y "afinidad", que podían evocar nociones alquímicas de simpatías ocultas. Al ceñirse a *rapports* (relaciones), mantenía una postura neutral sobre las cuestiones teoréticas que dividían a los newtonianos de los cartesianos. Las tablas de afinidad, como terminaron por llamarse, se multiplicaron y refinaron con los años. En 1775, Torbern Bergman presentaba la suya, dividida en dos partes (para reacciones secas y húmedas), con 34 columnas y 27 sustancias listadas en cada columna.

Se trabajaba con la idea de que las reacciones eran combinaciones y separaciones de componentes reversibles, que se suponían entidades estables en sus propiedades químicas. Un planteamiento cuya primogenitura suele concedérsele a Stahl (*Georg Ernst Stahl* (*1659-1734*), creador de vocabulario de la química y quien puso las bases para distinguirla de la física. En su opinión, la química se ocupaba de los cuerpos compuestos, "mixtos". Competía a la mecánica separar los cuerpos en sus constituyentes físicos homogéneos, mientras que la química atendía a los cuerpos formados por sustancias heterogéneas que no compartían las propiedades del compuesto originado.

Junto con su defensa de la independencia de la química, Stahl proponía doctrinas más discutibles. Distinguía tres principios en la composición de los mixtos: una tierra vitrificable, una mercurial o metálica y el "flogisto". El último, inspirado en J. J. Becher, era el principio de ignibilidad, que se liberaba de los cuerpos en forma de luz y calor mediante combustión (o por corrosión o calcinación en los metales). Stahl introdujo el término en 1697 en un tratado donde se propuso separar la combustión de la fermentación. Suponía que el azufre estaba compuesto de ácido vitriólico más flogisto, puesto que podía producirse mediante combinación de ácido vitriólico con una substancia que, como el carbón vegetal, era rica en flogisto. Indicaba también que la calcinación de los metales se asemeja a la combustión; puesto que procede con mucha mayor lentitud no despide calor sensible. Llegó a la conclusión de que los metales se componían de cal más flogisto. Hasta los colores y los olores de las sustancias dependían de la cuantía de flogisto que contenían.

La teoría de la calcinación de los metales, que implicaba la liberación de flogisto, constituía una observación coherente para quienes se aproximaban al fenómeno con una mirada cualitativa. Además, al relacionarlo con el proceso de combustión, se establecía implícitamente el papel crucial del fuego y el calor, que andando el tiempo se convirtieron en las preocupaciones centrales de la química del siglo XVIII. En los estados alemanes, los químicos de la escuela que Stahl había fundado continuaron desarrollando sus ideas. En Francia, Pierre-Joseph Macquer creía que Stahl "había cambiado la faz" de la química. En su *Dictionnaire de chymie*, Macquer aportó un resumen particularmente lúcido de la teoría del flogisto de Stahl, revelando las numerosas operaciones químicas que podían tratarse coherentemente sobre la premisa de la transferencia del flogisto de una sustancia a otra. Por su parte, Joseph Priestley abordaba el misterioso fluido en el marco de sus explicaciones sobre las relaciones en-



2. Cucúrbita con alambique, según dibujo del Liber fornacum *del pseudo Geber, a la izquierda; a su derecha, un proceso de calentamiento al "baño María"*

LA MUJER Y LA FARMACIA

FRAUEN IN DER PHARMAZIE: DIE GESCHICHTE EINES FRAUENBERUFES, por Gabriele Beisswanger, Gudrun Hahn, Evelyn Seibert, Ildikó Szász y Christl Trischler. Deutscher Apotheker Verlag; Stuttgart, 2001.

La emancipación de la mujer y la incorporación de la población femenina a las actividades productivas es uno de los fenómenos más importantes del siglo XX, más trascendente incluso que las reivindicaciones de las clases trabajadoras. Mientras que éstas, con su protagonismo, generan cambios sociales y políticos, las repercusiones de la emancipación femenina abarcan esos campos y además se extienden a la demografía, la estructura familiar, la moral, las costumbres, los hábitos sexuales y la edad de emancipación de los padres con respecto a los hijos. Este fenómeno genera una literatura en continuo aumento, que analiza la actividad de la mujer en los diferentes ámbitos laborales y las consecuencias que se derivan de la presencia femenina en escenarios que tradicionalmente le habían sido vedados.

El movimiento femenino avanza de forma ininterrumpida, ocupando primero las posiciones más favorables y accesibles. Una vez consolidadas éstas, se extiende hacia otros ámbitos más hostiles y reacios a la incorporación femenina. La industria y la ingeniería constituyen los últimos bastiones que todavía se resisten a la feminización, pero otros sectores, como la docencia y la sanidad, han sido feminizados. La farmacia es uno de los escenarios donde el movimiento femenino se ha implantado con más facilidad y comodidad, hasta llegar, en la actualidad, a un dominio absoluto en las aulas y en el ejercicio profesional, especialmente en el asistencial: las oficinas de farmacia y la farmacia hospitalaria.

Todo en la farmacia favorecía su feminización, desde su mitología a la práctica profesional. La diosa protectora de la farmacia es una mujer, Hygea, hija de Asclepio, el dios de la medicina. El símbolo de la farmacia es la copa de Hygea, un vaso en el que se anuda una serpiente. Las fuerzas de la naturaleza son puestas al servicio de la salud gracias al arte farmacéutico y la serpiente deposita su veneno, convertido en medicamento, en el interior del receptáculo, la copa de Hygea, que acoge a los medicamentos para su posterior administración.

La farmacia tiene un componente asistencial que resulta idóneo para su feminización. Los medicamentos curan, alivian, aportan bienestar, y el cuidado se ha asociado siempre con la actividad femenina. Por ello, el sector de las oficinas de farmacia, que trata directamente con la población enferma, se ha feminizado de forma casi absoluta, mientras que la industria, un sector dirigido por los principios de competencia y productividad, sigue todavía en manos de los hombres. Las mujeres han hecho acto de presencia primero allí donde su presencia no escandalizaba, por ser actividades ligadas al concepto de protección y cuidado. Más tarde, el movimiento femenino avanza en todas direcciones, produciendo cambios sociales de gran calado.

Cuatro farmacéuticas alemanas, Gabriele Beisswanger, Gudrun Hahn, Evelyn Seibert, Ildikó Szász y Christl Trischler, han publicado en 2001 un excelente estudio sobre la presencia de la mujer en la farmacia: *Frauen in der Pharmazie, Die Geschichte eines Frauenberufes*, publicado por Deutscher Apotheker Verlag Stuttgart. Este tipo de estudios defrauda muchas veces al lector y al especialista: los trabajos sobre la farmacia en un determinado escenario muy concreto o sobre un grupo humano determinado suelen aportar datos de dudosa utilidad. El trabajo de Beisswanger, Hahn, Seibert, Szász y Trischler no incide en los defectos frecuentes en este tipo de investigaciones y constituye una interesante aportación al estudio de la transformación experimentada por la farmacia alemana como resultado de su feminización.

Un mérito a destacar de *Frauen in der Pharmazie* es que las autoras no han silenciado períodos oscuros de gran importancia en la historia alemana, en su farmacia y en la incorporación de la mujer a esta profesión. El nacionalsocialismo y el comunismo marcaron la historia de la Alemania del siglo XX. Sin su estudio, la historia alemana se distorsiona y deviene incomprensible. Hay que agradecer a las autoras que no hayan optado por el silencio y que hayan dedicado sendos capítulos al espinoso tema de las relaciones entre la mujer y la farmacia durante dos épocas oscuras: el nacionalsocialismo y el comunismo de la República Democrática Alemana (DDR).

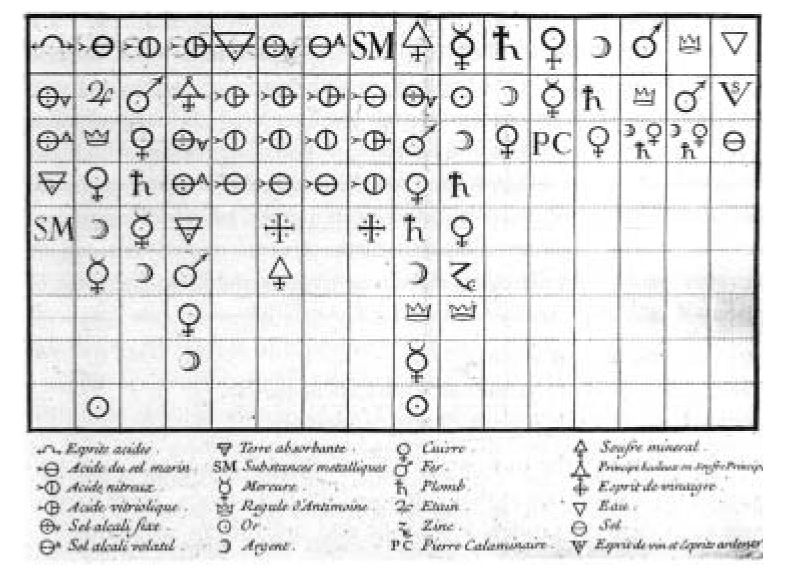
Frauen in der Pharmazie incluye en su última parte el estudio de la presencia de las farmacéuticas alemanas en la publicidad y los medios de comunicación, como el cine, con lo que se obtiene una visión multidisciplinar de la feminización de la farmacia en la Alemania del siglo XX: desde las aulas a las oficinas de farmacia y los hospitales a los medios de comunicación, con una menor presencia en la industria, aunque también en ella, con la excepción de los puestos directivos, la presencia femenina es considerable. La farmacia alemana del siglo XXI hace honor a su diosa, Hygea: como ella, tiene rostro y nombre de mujer.

—JUAN ESTEVA DE SAGRERA

tre los aires nuevos que había descubierto. Dio nueva vida al concepto, aun cuando su propia idea del flogisto tenía ya poco que ver con la de Stahl.

Los químicos eran conscientes, sin embargo, de que algunos metales ganaban peso cuando se calcinaban. Stahl pasó de puntillas sobre la contradicción: si el flogisto tenía peso, su pérdida en la calcinación debería comportar un peso menor. Cuando Guyton de Morveau mostró, a través de experimentos muy cuidadosos, en 1772, que *todos* los metales ganaban peso al calcinarse, el prestigio del flogisto había caído en barrena. Muy pocos aceptaron la tesis de Guyton de que el flogisto tuviera peso negativo. Lavoisier certificó su muerte al mostrar que la combustión y la calcinación consistían en la combinación de cuerpos y metales con oxígeno.

Stahl, Boerhaave y Hoffmann fueron los grandes sistemáticos de la medicina de comienzos del siglo XVIII.



3. Table des rapports *(1718), de Geoffroy*

donde adoptaba en parte la exposición cartesiana de sus causas. En esos años la forma de la cohesión entre las partículas era un asunto debatido. Para los seguidores de Descartes, la presión externa de la materia sutil circundante mantenía la presión interna que cohesionaba las partículas. Para gassendistas y atomistas, las partículas se uncían a la manera de gancho y ojo. Boerhaave atribuye la cohesión a la propia estructura de la materia.

En 1690 se doctoró en filosofía con una tesis sobre la distinción entre mente y cuerpo, también, de corte cartesiano: *Disputatio de distinctione mentis a corpore*. Tres años más tarde se gradúa en medicina, ahora por la Universidad de Hadervich, con una disertación sobre la semiología de las heces: *De utilitate explorandorum excrementorum in aegris, ut signorum*. Hasta su primer cargo de profesor de medicina en 1701, pasó buena parte de su tiempo estudiando matemática, medicina, química y física. Los escritos de 1701 (*De commendando studio Hippocratis*) y de 1703 (*De usu ratiocinii mechanici in medicina*) inciden en los verdaderos principios sobre los cuales debe construirse la medicina. Esos principios verdaderos se le revelan al hombre a través de la percepción de los sentidos y "sólo quien está exento de sectarismo, libre de ideas preconcebidas, vacío de inclinación hacia los pre-

Aunque profundos conocedores de la química, los tres rechazaban las interpretaciones iatroquímicas. A los dos primeros les unía, además, un sentido profundamente espiritual de la inquisición científica, aspecto en que insiste la autora de *Herman Boerhaave (1668-1738). Calvinist chemist and physician*. Vástago de un pastor protestante rural y de hija de un comerciante de Amsterdam, Boerhaave nació en Voorhout, próximo a Leiden, en cuya universidad se matriculó en teología.

En 1687 mantuvo su primera disputa pública, sobre la cohesión de los cuerpos, el *De cohesione corporum*,

BIOESTADISTICA

CHANCE IN BIOLOGY. USING PROBABILITY TO EXPLORE NATURE, por Mark Denny y Steve Gaines. Princeton University Press; Princeton, 2002.

Este libro, de acuerdo con la intención de los autores expresada en el prefacio, es un texto de estadística, pero un texto peculiar. Su objetivo no es informar sobre la estadística inferencial, es decir, de las pruebas de hipótesis, ni los análisis de correlación y regresión que se utilizan para el análisis y valoración de datos, tanto experimentales como obtenidos por la observación de la naturaleza.

Se presentan, en cambio, a un nivel asequible los conocimientos generales de estadística necesarios para entender la base estocástica de muchos procesos naturales que, a pesar de su estructura aleatoria, permiten hacer importantes predicciones acerca de cómo funciona el mundo. En este sentido es un libro interesante, porque de acuerdo con los objetivos propuestos por sus autores ayuda a la comprensión de la naturaleza, principalmente a los biólogos a quienes está dirigido el libro, porque en opinión de los autores suelen tener dificultades en aceptar la conjunción de la estructura estocástica de un proceso con la predictabilidad.

No obstante, en relación con esta opinión hacen alguna excepción refiriéndose a los especialistas en algunas materias como la genética de poblaciones, porque al tratar de procesos como la deriva genética dicha conjunción es evidente. En efecto, utilizan como ejemplo claro de proceso estocástico de resultados predecibles la pérdida de alelos y fijación final de solamente uno de ellos en las poblaciones sometidas a deriva genética.

El texto se expone en ocho capítulos, que terminan con el enunciado de problemas a resolver por el lector, cuya solución correcta se encuentra en un noveno y último capítulo.

La naturaleza del azar, los reglas del desorden, los modelos discretos y los modelos continuos del desorden, los movimientos aleatorios, la estadística de los extremos, ruido y percepción son los aspectos generales de estadística que se tratan. Además de la deriva genética, las aplicaciones al mundo real que se exponen se refieren al sida y la fórmula de Bayes, los movimientos de las moléculas en distintos procesos biológicos, diversos aspectos de la difusión y de los movimientos musculares, la agitación térmica, los riesgos de las bebidas alcohólicas en las fiestas y del oleaje marino, la mecánica de la percepción de los sentidos en los animales, especialmente en relación con la estructura y función de la retina en los vertebrados, las propiedades de las telas de araña, etc.

—ANTONIO PREVOSTI PELEGRÍN

juicios, el que se limita a aprender y relata lo que observa” es el capaz de seguir a la naturaleza. Desde el comienzo de su docencia dio a sus partículas propiedades no geométricas: ímpetu, elasticidad, gravedad y atracción, amén de forma y tamaño. Introdujo de ese modo el newtonismo en Leiden.

Aunque destacó también en botánica, desempeñó un papel importante en la difusión de la sexualidad vegetal, aquí importa su papel instrumental en el establecimiento académico de la química en la universidad. Su postura sobre la relación entre medicina y química la avanza en la *Oratio de chemia suos errores expurgante*, disertación pronunciada en 1718, el mismo año en que acepta suceder a Jacob Le Mort en la cátedra de química. Compendia sus ideas en *Elementa chemiae*, manual publicado en 1732. A diferencia de los textos de Lefebvre, Lémery y Geoffroy, se atenía más a las explicaciones de la teoría que a las preparaciones del arte. En vez de presentar un conjunto de recetas se esforzó por hacer entender los elementos o principios básicos. Animó a sus lectores no a seguir fórmulas, sino a pensar qué es y como procede la química. Lo que no impedía que defendiera una química alejada de la especulación y apegada a los hechos observados. Denunciaba la química falsa que escondía su vacuidad en un lenguaje ininteligible.

Con espíritu ecléctico desarrolló su propio sistema, basado en la materia y en las fuerzas del movimiento y del cambio. El objeto de la química, para él, consistía en cambiar los cuerpos por medio del movimiento. Definía la materia como inerte y pasiva, mientras que el movimiento podía excitarse mediante el fuego; concebía a éste como un fluido material imponderable, capaz de introducirse en la materia ponderable; era el primer agente de cambio químico, pero no participaba en la combinación química. Cullen, en Escocia, identificó el fuego de Boerhaave con el éter de Newton.

La reticencia ante la especulación manifestada por Stahl y Boerhaave, el rechazo a una impostación filosófica de la química (filosofía química), cede paso, como nota distintiva de la química prelavoisieriana, a una aparición de dominios conceptuales que emergen del laboratorio y de la mina, es decir, a una química filosófica, configurada en torno a la noción de afinidad. Tal es la tesis de fondo de Kim en *Affinity*. En el siglo XVIII, la afinidad química desempeñó un papel importante como metáfora, dominio de teoría y tema de investigación. De acuerdo con el principio de afinidad, lo similar se une con lo similar. Kim culpa a Lavoisier y a su *Traité élémentaire de chimie* (1789) de nuestra amnesia histórica del concepto de afinidad química. El introductor de una nomenclatura y definiciones diamantinas, que consideraba la afinidad “parte trascendental” de la química, la pospuso para un tratamiento harto más detenido de lo que podía ofrecer en su texto elemental.

Para devolver la afinidad química a su lugar idóneo hemos de recordar los pasos dados por la química hacia la consecución de su autonomía, desde que Boyle la aupara al rango de “clave” de la “verdadera” filosofía natural. Boyle pugnó por disociar la práctica de laboratorio de la filosofía y forjar una química filosófica [*chemia philosophica*] que tradujera los saberes del laboratorio del apotecario y del metalúrgico para una audiencia ilustrada. Mientras que la filosofía química —aristotélica, paracelsista, cartesiana o newtoniana— se proponía explicar los fenómenos como una parte del orden general del universo, en la rebotica y en la fragua se manejaban otros conceptos que irían adquiriendo vertebración sistemática a lo largo del siglo XVIII. A diferencia de teorías específicas, como el flogisto o la teoría del oxígeno, que resultaron útiles para dotar de sentido a un espectro limitado de fenómenos, los dominios de teorías sobre la composición y la afinidad reflejaban estrategias prácticas más amplias, y esenciales, en las que se apoyaban los químicos en su trabajo diario.



4. Herman Boerhaave (1668-1738)

Los químicos necesitaban saber qué sustancias y en qué cuantía reaccionaban entre sí. El comercio de los apotecarios dependía de la preparación de una mezcla exacta de “simples” para producir una “composición” médicamente correcta, en tanto que los metalúrgicos tenían que distribuir los metales en razón de su diferente disolución en ácidos y en el fuego. Los químicos aplicaban esos mandatos prácticos en sus ensayos a través de sistemas experimentales muy determinados: la destilación de los vegetales y la disolución selectiva de metales en ácidos. Desde el conocimiento práctico adquirido, expandían estos sistemas en los dominios de la teoría general de composición y afinidad. Esas parcelas del saber, depuradas una y otra vez por la contrastación experimental, fueron creando las bases para el progreso de una química teórica. Tienen esos hitos correlatos metodológicos: primero la composición química modelada sobre el método de la destilación, desbancada pronto por los métodos de disolución con las tablas de afinidades.

—LUIS ALONSO

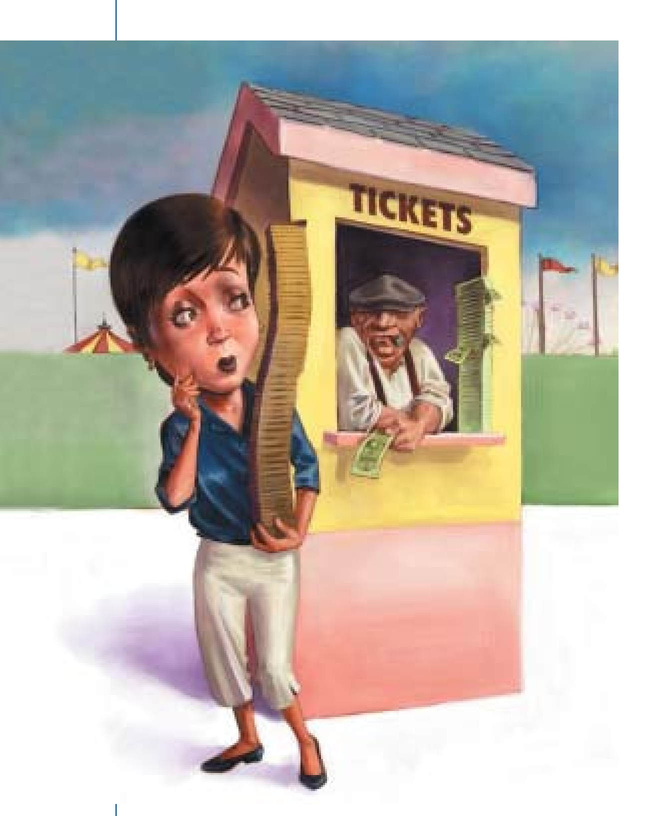
AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Lamentos acotados

Nos ha dado por el *squash*, y queremos practicarlo en las pistas de un club. El club ofrece dos posibilidades: un abono anual de 400 dólares, o bien entradas de 20 dólares por cada uso de la cancha. Nuestra intención es jugar varias veces a la semana, pero somos proclives a las lesiones, y sabemos que, si nos lesionamos, no podremos jugar más. Un ser presciente podría profetizar si nos vamos a lesionar y cuándo; su vaticinio nos permitiría determinar si es preferible contratar el abono anual o ir pagando por sesión. Pero como no somos adivinos, deseamos idear una estrategia que minimice nuestro “cociente de lamentaciones”, a saber, la cantidad gastada dividida entre la que habría gastado el ser presciente.

Si hubiéramos decidido adquirir un abono anual ya desde el principio, y nos lesionásemos en el primer día en la cancha, el “cociente de lamentaciones” sería de 20: los 400 dólares que habríamos gastado divididos entre los 20 dólares que habría gastado el clarividente. Si, por el contrario, decidimos pagar la entrada cada vez durante un año y jugamos 100 veces antes de sufrir la lesión, el cociente de arrepentimiento sería 5: los 2000 dólares gastados divididos entre los 400 dólares del ser presciente. ¿Existe algún procedimiento para mantener por debajo de 2 el cociente de lamentación, con independencia de cuándo nos vayamos a lesionar? La solución de este problema preliminar se ofrece al pie de la página.



Los problemas de esta clase se denominan, en la jerga matemática, problemas de análisis competitivo. Tomemos otro ejemplo: disponemos de 90 entradas para un partido de fútbol, que podemos canjear por dinero en efectivo. Hay una caseta de canje. El cambista tiene una pila de billetes de 1 y 5 dólares. Nos ofrecerá el que esté encima, sea de 1 dólar, sea de 5, por cada una de nuestras entradas. Tenemos la opción de rechazar el dólar, con la esperanza de que más adelante nos toquen 5. En tal caso, nosotros nos quedamos con nuestra entrada y el cambista aparta su billete de 1 dólar; no se volverá a verlo. Ahora bien, el cambista tiene derecho a concluir los canjes cuando quiera. Después, nuestras entradas nada valdrán.

El ser presciente sabría por adelantado cuánto va a ofrecer el cambista y en qué momento van a concluir los canjes, pero nosotros, no. ¿Será posible hallar una estrategia que garantice un cociente de lamentaciones (en este caso, las ganancias del oráculo divididas por las nuestras) que no sea mayor de 1,8? ¿Cuál habría de ser la estrategia si las dos posibles ofertas fuesen de 1 dólar y de 1.000.000 de dólares? ¿Mejora, o empeora, el cociente de lamentaciones?

MATT COLLINS

Solución del problema del mes pasado:

En el primer problema, BEF se deriva directamente de AB y EF; DEF, de DH y EF; ADE, de AB y DEF; ACD, de ADE y CG; ACF, de ACD y EF; ADG, de ACD y CG; y BEG, de BEF y CG. FGH requiere de tres progenitores.

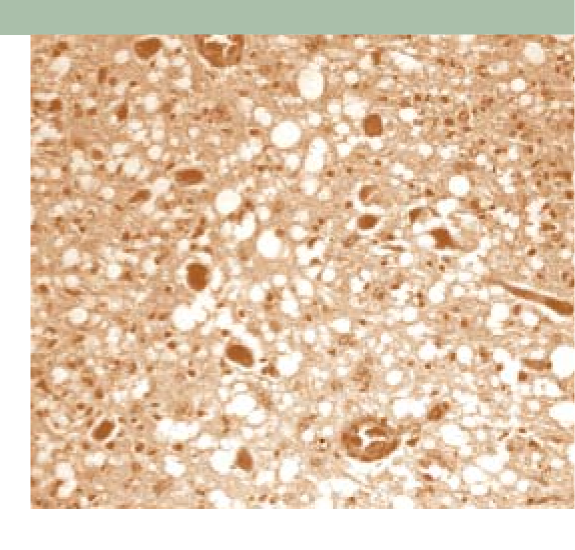
En el segundo problema, cuatro posibles especies progenitoras son BE, DF, AC y GH.

Solución en la Red

Verán una explicación más completa de la solución del problema del mes pasado y la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

SOLUCION DEL PROBLEMA PRELIMINAR: Se paga entrada 19 veces; después se adquiere un abono anual. Si nos lesionamos en alguna de las primeras 19 veces, el cociente de lamentaciones sería 1. Si la lesión se produjera más adelante, sería de 1,95.





LA ENFERMEDAD CONSUNTIVA CRONICA, por Philip Yam

La enfermedad consuntiva crónica, emparentada con la enfermedad de las vacas locas, se está extendiendo entre los ciervos salvajes de los Estados Unidos. Si no se la contiene, la enfermedad fatal puede amenazar al ganado y a la población humana.

PECULIARIDAD DEL PAISAJE DE MARTE, por Arden L. Albee

Los extraños procesos dinámicos que dan forma a la superficie del planeta rojo revelan que Marte no es simplemente una Tierra más fría y seca.

AUTORREPARACION DE ORDENADORES, por Armando Fox y David Patterson

Al no poder suprimir del todo los fallos de un sistema, es importante recuperar cuanto antes las condiciones de servicio.

MAS ALLA DEL MODELO ESTANDAR DE LA FISICA, por Gordon Kane

El modelo estándar de la física de partículas está en un momento crucial de su historia: se halla, a un tiempo, en la cumbre de sus éxitos y a punto de ser superado.

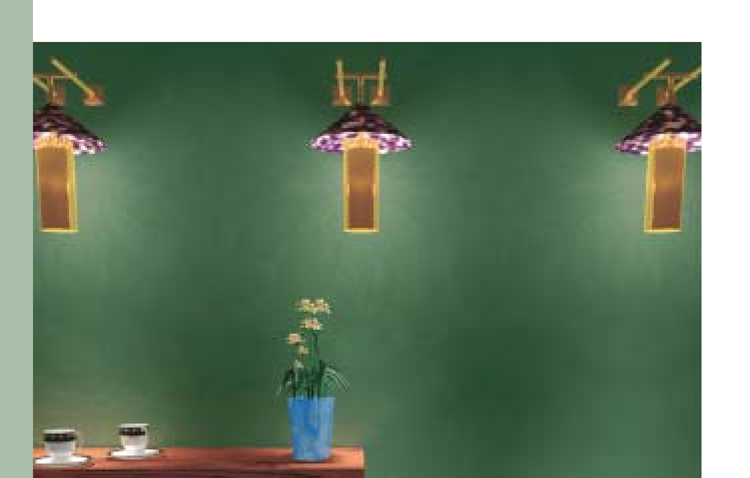


CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR GASOLINA, por Mónica Rosell, Sílvia Lacorte y Damià Barceló

Los aditivos oxigenados de la gasolina sustituyeron a los derivados de plomo. ¿En qué medida uno de ellos, el metil tert-butil éter, afecta a la calidad de las aguas?

CARTAS ENCADENADAS E HISTORIALES DE EVOLUCION, por Charles H. Bennett, Ming Li, Bin Ma

Un estudio de las cartas en cadena permite ver el modo de inferir el árbol genealógico de todo cuanto evolucione en el tiempo, ya sean genomas, lenguas o plagios académicos.



POR QUE VEMOS LO QUE VEMOS, por Dale Purves, R. Beau Lotto y Surajt Nundy

Una estrategia probabilística, basada en la experiencia histórica del sujeto, explica la notable diferencia entre lo que vemos y la realidad física.